



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE  
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## STUDIUM VLASTNOSTÍ LASEROVÝCH SVARŮ HLINÍKOVÉ SLITINY TŘÍDY 5000

STUDY OF THE PROPERTIES OF LASER WELDS ALUMINUM ALLOY GRADE 5000

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. FILIP ČERNOHOUS

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. RNDr. LIBOR MRŇA, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2013/2014

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Filip Černohous

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

**Studium vlastností laserových svarů hliníkové slitiny třídy 5000**

v anglickém jazyce:

**Study of the properties of laser welds aluminum alloy grade 5000**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Laserové svařování hliníkových slitin má svá specifika plynoucí z velké tepelné vodivosti materiálu i jeho vysoké odraznosti na pracovní vlnové délce 1070 nm YbYAG laseru. Vzhledem k úmyslu využít tento typ hliníkových slitin při výrobě solárních absorbérů, je třeba studovat závislost vlastností svarů na procesních parametrech (výkon laseru, svařovací rychlost, poloha ohniska).

Cíle diplomové práce:

Osvojit si technologii svařování laserem. Navrhnout metodiku experimentu. Provést mechanické zkoušky a vyhodnotit strukturu svarů. Komplexně posoudit vliv svařovacích parametrů na výsledný svar.

Seznam odborné literatury:

- 1.BENKO B., FODEREK P., KOSEČEK M., BIELAK R.l: Laserové technologie,1.vyd., Bratislava, Vydavateľstvo STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9
- 2.DULEY W.W.: Laser welding, New York 1999, A.Wiley-Interscience publication, ISBN 0-471-24679-4
- 3.TURŇA M., Špeciálne metódy zvarovania, ALFA Bratislava, 1989, ISBN 80-05-00097-9
- 4.KOLEKTIV AUTORŮ. Materiály a jejich svařitelnost, 1.vyd. Zeross, Ostrava 2001, 292s. ISBN 80-85771-85-3
- 5.KOLEKTIV AUTORŮ. Technologie svařování a zařízení, 1.vyd. Zeross, Ostrava 2001, 395s. ISBN 80-85771-81-0
- 6.KOLEKTIV AUTORŮ. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, 1.vyd. Zeross, Ostrava 2000, 214s. ISBN 80-85771-72-1

Vedoucí diplomové práce: doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 19.11.2013

L.S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

ČERNOHOUS Filip: Svařování laserem slitin hliníku třídy 5000 a jejich studium

V práci se řešily vlastnosti laserových svarů hliníku třídy 5000. Tyto slitiny se vyznačují nízkou pevností a dobrou korozní odolností. Vytvořilo se několik vzorových svarů na Yb-YAG optickém laseru, které se podrobily mechanickým zkouškám. V práci jsou uvedeny postupy laserových technologií a svařování, dále obecné vlastnosti a vady svarů. Zhotovené svary se zhodnotily a jsou uvedeny nejlepší svařovací parametry ze zkoumaných procesních parametrů.

### **Klíčová slova**

Laser, svařování, hliník, svary, vlastnosti

## **ABSTRACT**

ČERNOHOUS Filip: Welding of laser alloys of aluminium class 5000th and their study

In working to address the properties of laser welds of aluminum class 5000th These alloys are characterized by low strength and good corrosion resistance. Created a few sample welds on Yb-YAG optical laser, which is subjected to mechanical testing . Procedures are provided in the work of laser technology and welding, as well as general properties and defects in welds. Made welds was evaluated and listed the best welding parameters of the studied process parameters.

### **Key words**

Laser, welding, aluminium, seam, properties

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ČERNOHOUS, Filip. *Studium vlastností laserových svarů hliníkové slitiny třídy 5000*. Brno, 2014. 61s, 4 přílohy, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce doc., RNDr. Libor Mrňa Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Studium vlastností laserových svarů hliníkové slitiny třídy 5000** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

Datum

---

Bc. Filip Černohous

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji všem, kteří mi jakýmkoli způsobem napomohli v řešení mé závěrečné práce, vedoucímu práce doc., RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D., ale také konzultantům, rodině a dalším. Tato práce vznikla za podpory Evropské komise a Ministerstva školství mládeže a tělovýchovy České republiky (projekt. č. CZ.1.05/2.1.00/01.0017) "ALISI - Centrum pokročilých diagnostických metod a technologií" a tento je dále podpořen z Národního programu udržitelnosti I. - NPU I (LO1212), jehož cílem je podpora výzkumu, experimentálního vývoje a inovací z veřejných prostředků.

## **OBSAH**

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Úvod

<b>1 Zhodnocení situace .....</b>	<b>8</b>
<b>2 Laser .....</b>	<b>9</b>
2.1 Svařování.....	9
2.2 Princip laserů.....	10
2.3 Historie laserů .....	10
<b>3 Lasery dělení .....</b>	<b>12</b>
3.1 Dělení laserů.....	12
3.1.1 Pevnolátkové lasery.....	13
3.1.2 Kapalinové lasery .....	15
3.1.3 Plynové lasery .....	15
3.1.4 Polovodičové lasery .....	16
<b>4 Laserové technologie .....</b>	<b>18</b>
4.1 Svařování.....	18
4.1.1 Kondukční svařování.....	19
4.1.1 Penetrační svařování .....	19
4.1.2 Svařovací parametry.....	20
4.1.2 Příprava svarových ploch .....	20
4.2 Řezání.....	21
4.3 Vrtání laserem .....	21
4.4 Tepelné zpracování .....	22
4.5 Značení a popisování.....	22
4.6 Gravírování.....	23
4.7 Nanášení povlakování .....	24
4.8 Hybridní laserové svařování.....	24
<b>5 Hliník a jeho slitiny .....</b>	<b>26</b>
5.1 Hliník.....	26
5.2 Slitiny hliníku.....	27
5.2.1 Hliníkové slitiny pro tváření .....	27
5.2.2 Třída 5000 .....	28
5.3 Sváření hliníku .....	28
5.3.1 Svařování metodou TIG .....	29
5.3.2 Svařování metodou MIG .....	29
5.3.3 Svařování laserem .....	30
5.3.4 Hybridní svařování hliníku.....	31

<b>6 Svary .....</b>	<b>32</b>
6.1 Typy svarových spojů .....	32
6.2 Svarové vady .....	33
6.3 Dělení svarových vad .....	34
6.4 Kontrola svarových spojů.....	36
6.4.1 Nedestruktivní zkoušky .....	36
6.4.2 Destruktivní zkoušky.....	38
<b>7 Průběh experimentu .....</b>	<b>41</b>
7.1 Svařování hliníku .....	41
7.2 Makroskopická zkouška .....	43
7.2 Zkouška tvrdosti .....	54
7.3 Tahová zkouška .....	55
7.4 Vyhodnocení výsledků .....	59
<b>8 Závěr.....</b>	<b>60</b>
Seznam použitých zdrojů	
Použité symboly	
Použité zkratky	
Seznam obrázků	
Seznam tabulek	
Seznam vzorců	
Přílohy	

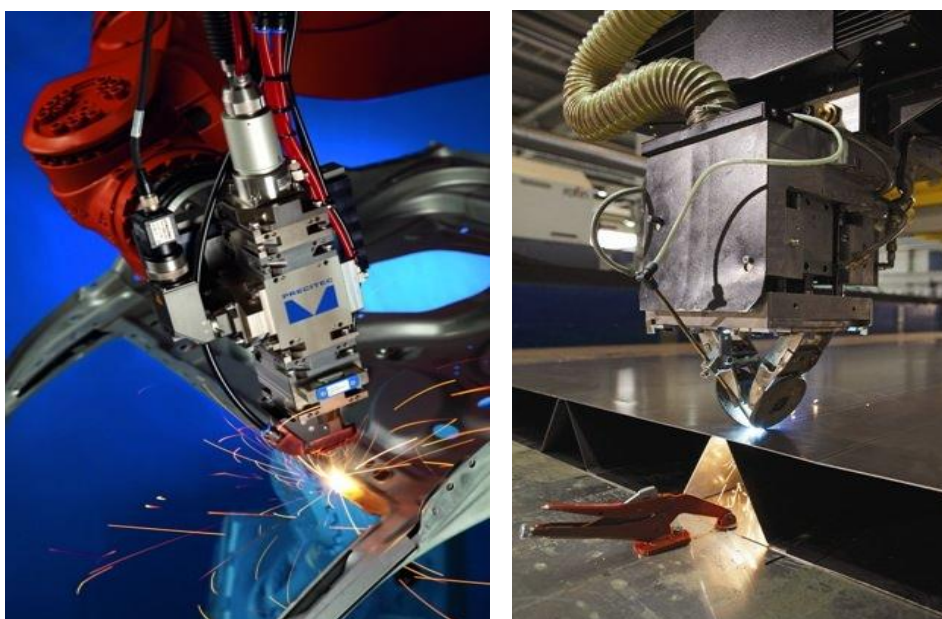


## ÚVOD [7],[21]

V současné době výroba technických součástí a součástek vyžaduje zrychlení výroby, snížení nákladů a zpřesnění vyrobených dílů ve všech možných oborech průmyslu a výroby. Těchto požadavků se dosahuje modernizací a automatizací zařízení, sdružováním výroby. V mnoha oborech věnujících se dělení a svařování materiálů se častěji zavádějí technologie jako je obrábění vodním paprskem, řezání svazkem plazmatu či svařování laserem.

Firmy si od zavádění nových technologií slibují zlepšení výsledků. Nové technologie umožňují obrábění součástí, které byly nákladné, nebo výrobně příliš složité.

V současné době se hliník svařuje hlavně metodami MIG, TIG, FSW. Vysoké Učení Technické v Brně ve spolupráci a Akademií věd, chce vyzkoušet svařování hliníku třídy 5000 na pevnolátkovém vláknovém laseru. Tento typ hliníku se užívá jako materiál pro výrobu solárních absorberů. Zjistíme, zda zavedení technologie svařování laserem hliníku třídy 5000 do výroby namísto stávajícího způsobu svařování přinese lepší výsledky. Příklady svařování kovů laserem, jsou zobrazeny na obr. 1 Svařování laserem.



Obr. 1 Svařování laserem. [7],[21]

## 1 ZHODNOCENÍ SITUACE

V současné době se jako materiál pro svařování solárních absorbérů využívá hlavně nerez. Ten však nemá dostatečnou tepelnou vodivost, která je od nich vyžadována. Z tohoto důvodu se začal hledat vhodnější materiál splňující tento požadavek. Tímto materiálem se stal hliník, konkrétně tvářecí třída 5000. Hliník se vyznačuje dobrou korozní odolností a tepelnou vodivostí. Proto byl zvolen jako vhodný materiál, i s ohledem na horší mechanické vlastnosti dosahuje vyšších účinností než nerez.

Pro vybraný materiál bylo zapotřebí zvolit nejvhodnější metodu svařování. Svařování ultrazvukem je vhodné jen na tenké díly. Odporové svařování je nevhodné kvůli vodivosti hliníku, pro kterou byl zvolen. Metoda FSW (Friction Stir Welding) vyžaduje velmi pevné upnutí, které nelze dostatečně zajistit pro rozměrnost svařovaného plechu. Navíc zhotovování svarů touto metodou je časově náročné. Jako vhodná metoda bylo vybráno svařování laserem. Laserové svařování umožňuje svařování průvarem (provaření více plechů na sobě), nabízí více svařovacích režimů a poskytuje dostatečný výkon. Vybranou metodou se tedy stalo svařování laserem.

Absorbér se skládá ze dvou vzájemně svařených plechů. Do takto svařených plechů je vehnán vzduch, který je působením slunečního záření ohříván. Aby bylo možno nafouknout absorbér, jsou svary vyhotoveny po celém jeho obvodu a ploše (obr. 2). Při provozu jsou na absorbéry vyvíjeny velké tlaky. Proto musí vyhotovené svary vydržet mechanické namáhání. Mechanické podmínky svarů jsou testovány.



Obr. 2 Solární absorbér.

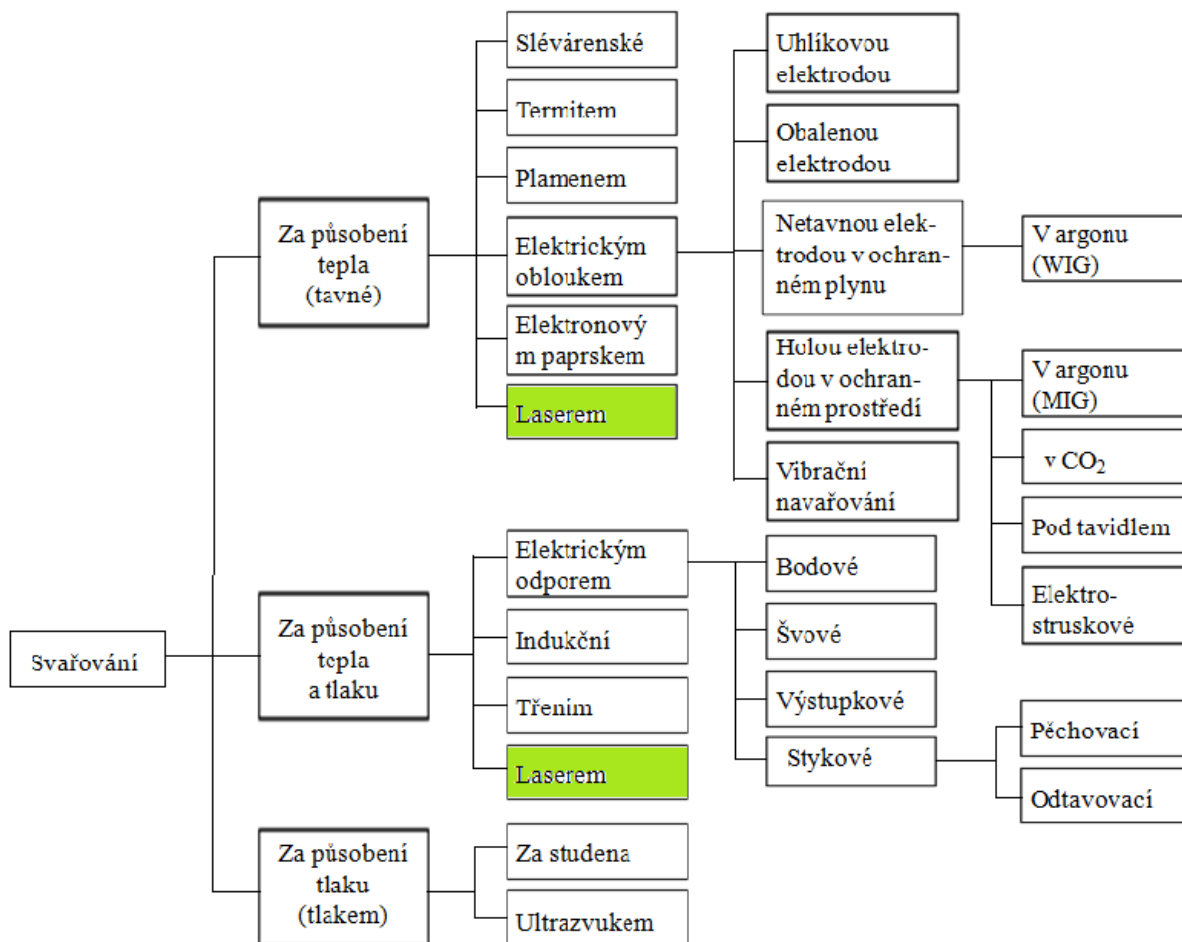
Diplomová práce se zabývá porovnáváním svařovacích parametrů v závislosti na výslednou kvalitu svaru a na jeho vlastnosti. Svařené vzorky se podrobí mechanickým zkouškám. Experiment bude prováděn v Akademii věd, na Ústavu Přístrojové Techniky. V závěru práce budou získané výsledky navzájem porovnány a budou vybrány nejlepší svařovací parametry pro výrobu svaru.

## 2 LASER

### 2.1 Svařování [35],[49],[52]

Svařování - jedná se o technologický proces, při němž vzniká nerozebíratelné spojení strojní součásti či součástí na meziatomové úrovni při jejich ohřevu, plastické deformaci či působením obojího.

Výhodami takovýchto spojů jsou trvanlivost, vysoká pevnost a těsnost. Naopak mezi nevýhody patří změny v mechanických vlastnostech a struktuře, vnitřní pnutí ve svaru. Základní rozdělení svařovacích metod je znázorněno na obr. 3 Přehled svařovacích metod. Svařování laserem je zde zvýrazněno.



Obr. 3 Přehled svařovacích metod. [49]

Základními metodami svařování jsou:

- **Tlakové svařování** – svařované součásti se přiblíží na vzdálenost krystalické mřížky. Vlivem difuze se vytvoří vazby mezi hraničními mřížkami kovů.
- **Tavné svařování** – svařování probíhá bez působení tlaku na součásti. Svar je vytvořen natavením svarových ploch základního materiálu.
- **Za působení tepla a tlaku** – nejdříve nastane natavení materiálu, poté je vyvozen tlak a dojde ke svaření materiálů.

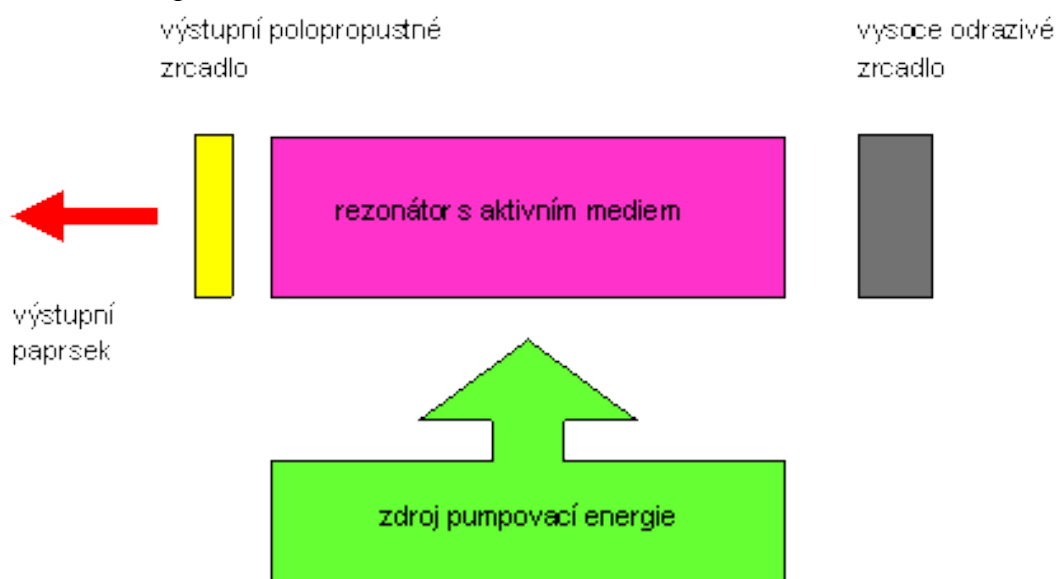
## 2.2 Princip laserů [15],[42],[47]

Laser = Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což česky znamená zesílení světla stimulovanou emisí záření. Světlo se chová duálně – jako vlna a zároveň jako elementární částice (foton).

Laser pracuje na bázi vynuceného záření. Indukovaná emise se vyvolá dopadem záření na atom prvku. Elektron v jádru je donucen přijmout energii a zaujmout místo ve vyšší oběžné dráze. Přijetím další energie se elektron vrátí zpět (zachování rovnováhy sil) a přijatou energii vyzáří. Toto záření je monochromatické a koherentní  $\Rightarrow$  částice (fotony) se pohybují ve svazku jedním směrem a jsou v průřezu přibližně pravidelně rozmístěné. Princip laseru je zjednodušeně zobrazen na obr. 4.

Základními prvky laseru jsou:

- **Aktivní prostředí** – Vzniká v něm stimulovaná emise, stanovuje délku vlny záření. Médium je průhledné a vykazuje schopnost odvádět vzniklé teplo. Známe tři základní typy médií – pevné, tekuté, plynné.
- **Optický rezonátor** – Skládá se ze dvou zrcadel. Prvního klasického zrcadla a druhého polopropustného.
- **Budící zařízení** – Ovlivňuje režim, ve kterém laser pracuje. Buzení je udáno laserovým médiem, které dodává elektronům energii pro pohyb.
- **Chladicí systém** – Odvádí energii, která se nepřeměnila v záření ale v teplo. Hlavně z aktivního prostředí.



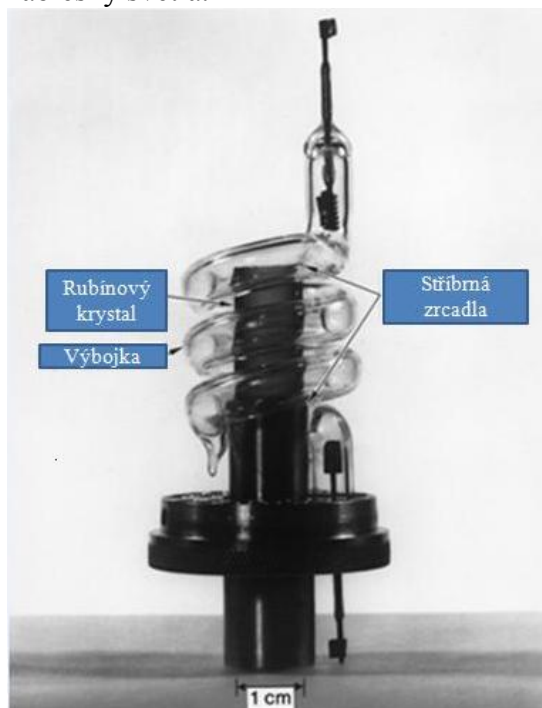
Obr. 4 Princip laseru. [47]

## 2.3 Historie laserů [2],[10],[15],[19],[42],[48]

Jako první projeвили zájem o světelný paprsek už staří Řekové. Teprve Isaacu Newtonovi se v 17. století podařilo za pomoci skleněného krystalu rozložit světlo na spektrum barev. Dalším průkopníkem v oblasti světla byl Thomas Young, který prováděl pokusy s ohybem a interferencí světla a dokázal, že světlo má vlnovou podstatu. Až v roce 1916 Einstein ve své práci „Emise a absorpce světla podle kvantové teorie“ ukázal, že za správných okolností mohou atomy uvolnit přebytečnou energii jako světlo, a to buď spontánně, nebo vynuceným způsobem.

K myšlence na první laser došlo tak, že někteří fyzici (např. Landenburg, Kopferman, Fabrikant) se zamysleli nad možností vytvoření energeticky obohaceného aktivního prostředí. V roce 1951 dostali ruští vědci (Fabrikant, Vudynský a Butajevová) patent na princip vytvá-

ření tohoto prostředí v plynovém výboji. V roce 1955 došlo k vytvoření molekulárního svazkového generátoru – MASERu (kvantový generátor vysokých frekvencí, pracující v oblasti vln na principu vynuceného záření). Roku 1960 fyzik Mainman postavil první “optický maser“, anebo laser obr. 5. Jako aktivního prostředí využíval krystal rubínu, kterým promítal záblesky světla.



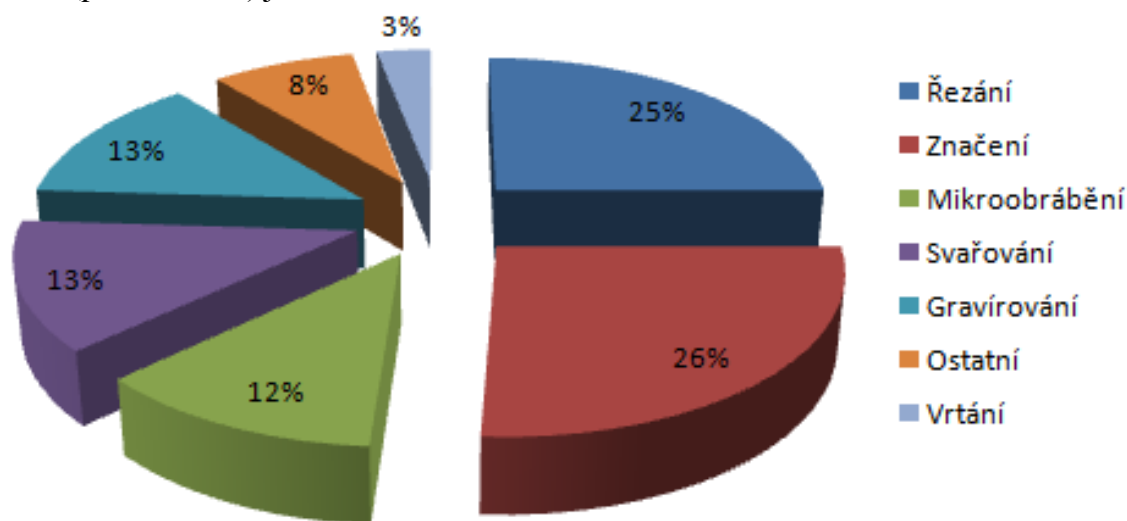
Obr. 5 První laser T. Mainmana. [48]

Název laser vznikl zkratkou z anglického názvu „**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation“ – zesilování světla pomocí stimulované emise záření.

Úspěch na poli laserů zapříčinil další výzkumy a práce na nových typech laserů. Bylo dokázáno, že laserovou reakci je možno vyvolat v téměř každém prostředí. Od roku 1961 začal prudký vývoj různých typů laserů a laserové technologie. V roce 1962 došlo v Brně k sestavení prvního Československého čpavkového laseru.

Na principu technologických aplikací se pracovalo ještě v druhé polovině šedesátých let. Prokázalo se, že relativně malé výkony (od 10 do 200 W) jsou dostatečné pro hodně technologických operací. Rozvoj všech typů laserů postupoval rychle. Docházelo ke zvyšování výkonů a zkracování vlnových délek. Laserové obrábění se považuje za fyzikální způsob obrábění čistým zdrojem s energií vysoké hustoty. Laser dokáže působit na velmi malou plochu při velkém přívodu energie - odvod tepla z materiálu je menší než jeho přívod.

Při zpracování kovů se uplatňují lasery při dělení, sváření, tepelném zpracování povrchu. Za padesát let od vytvoření prvního laseru tato technologie našla uplatnění v mnohých odvětvích. Využívá se v medicíně, biologii, geodézii, energetice, vojenské technice, metrologii a v mnoha jiných lidských odvětvích. Využití v laseru v jednotlivých technologických oborech (pro rok 2008) je znázorněno na obr. 6.



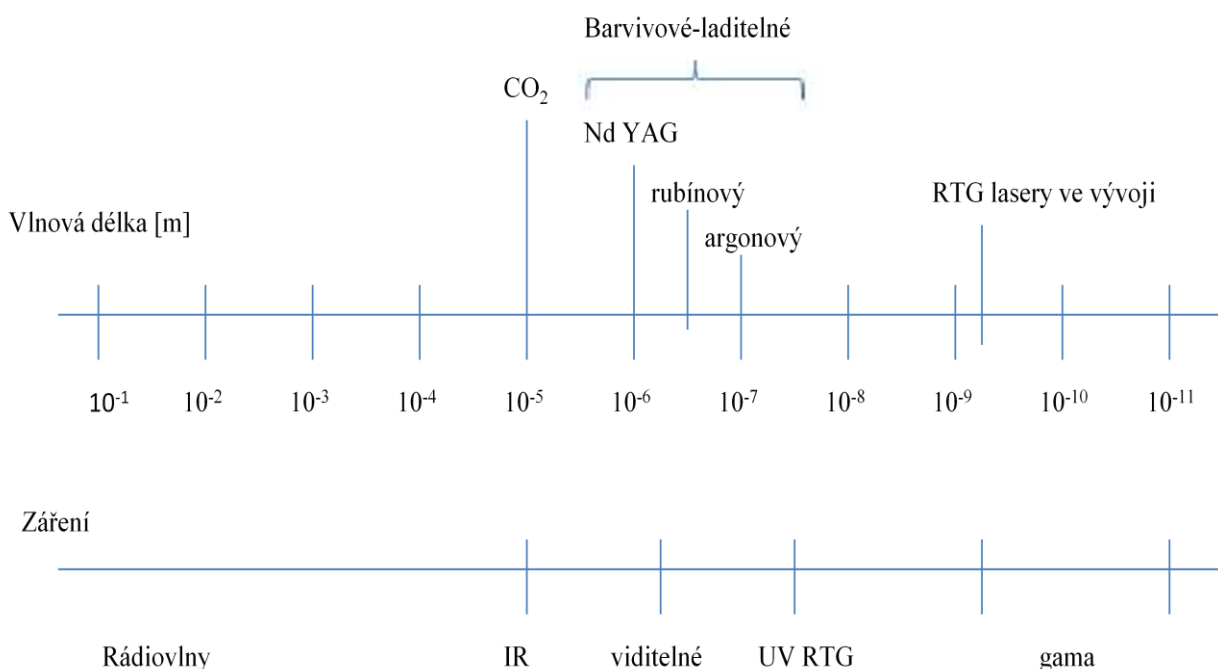
Obr. 6 Procentuální podíl nejdůležitějších laserových aplikací. [42]

### 3 LASERY DĚLENÍ

Od sestrojení prvního laseru vývoj přinesl množství různých typů laserů s různými vlastnostmi, díky kterým jsou vhodné pro různé praktické využití.

#### 3.1 Dělení laserů [2],[6],[9],[15],[21],[23],[24],[25],[27],[36],[39],[42],[50]

- Podle charakteru aktivního prostředí
  - Pevnolátkové
  - Kapalinové
  - Plynové
  - Polovodičové
- Podle druhu energie užitého k buzení
  - Optické
  - Elektrickým výbojem
  - Chemické
  - Elektronovým svazkem
  - Tepelnými změnami
  - Rekombinací
  - Injekcí nosičů náboje
- Podle režimu práce
  - Spojité (kontinuální)
  - Impulzní
- Podle vlnové délky (obr. 7 Dělení laserů dle vlnových délek záření)
  - Infračervené
  - V oblasti viditelného světla
  - Ultrafialové
  - Rentgenové



Obr. 7 Dělení laserů dle vlnových délek záření. [2]



### 3.1.1 Pevnolátkové lasery [2],[9],[36],[50]

Tyto lasery využívají jako aktivní prostředí monokrystalické nebo amorfni látky. Jedná se o skla, do kterých se přidávají aktivační prvky (např. Nd:YAG). Energie je vyzařována při změně energetických stavů v přísadových atomech. Vlastnosti aktivních látek musí splňovat:

- musí mít systém energetických hladin dovolujících inverzní populaci,
- musí mít široké absorpční pásmo,
- pravděpodobnost zářivých indukovaných přechodů musí být velká na pracovní frekvenci,
- má mít minimální hodnotu nerezonančních ztrát.

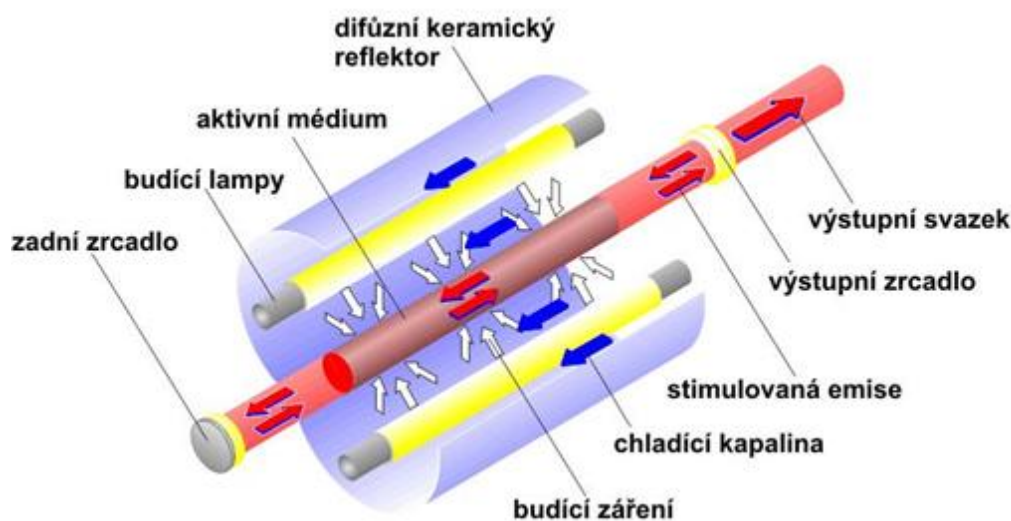
Nejpoužívanější aktivátory jsou některé prvky skupiny železa (Ni, Cr, Co) a lanthanoidy. Mezi nejpoužívanější základní látky patří: korund, sklo, fluorit... Mimo to musí aktivní látky splňovat i mnohé technologické aspekty: fotochemickou odolnost, možnost mechanického opracování apod.

Pevnolátkové lasery pracují převážně v impulsním režimu a jako zdroj se užívají plynové výbojky. Nejpoužívanějšími zástupci jsou:

- rubínový laser
- Nd: YAG laser
- Nd: sklo laser

#### Nd: YAG laser

Jde o nejpoužívanější typ pevnolátkového laseru. Pracuje na bázi krystalu Nd: YAG. Aktivním materiálem je izotropní krystal yttrito-hliníkového granátu ( $Y_3Al_5O_{12}$ ), obvykle ve tvaru tyčky. Jedná se o bezbarvý, opticky izotropní krystal kubické struktury. Schéma laseru je znázorněno na obr. 8.



Obr. 8 Nd: YAG laser. [50]

V současnosti je nejvyužívanějším krystalem, neboť jsme schopni ho pěstovat a opracovat do požadovaných tvarů při zachování optické kvality. Tento typ laseru umožňuje provoz impulsní i kontinuální. Emitovaná vlnová délka světla je 1064,1 nm. S menší účinností se využívají emitované vlnové délky 940, 1120, 1320 a 1440 nm. K optickému nabuzení v impulsních laserech dochází díky kryptonovým zábleskovým lampám, u kontinuálních vysokovýkonných laserů jsou to kryptonové obloukové lampy. Životnost laserů se liší od použitého typu buzení – diody a výbojky je nutno servisně vyměňovat. K vedení laserového výkonu z laserového zdroje se využívá optického vlákna, které přenáší výkon, ale není aktivní.

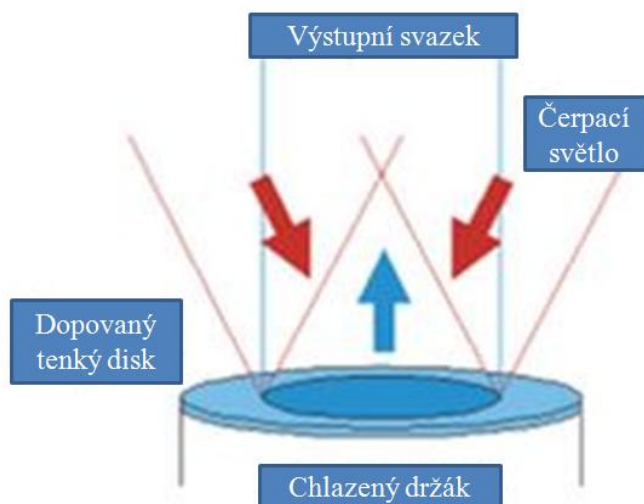
Nd: YAG lasery mají díky jednoduchosti konstrukce a dosahovanému výkonu široké uplatnění. Mají uplatnění v medicínských oborech, ve vědě, vojenských aplikacích, v automobilovém a elektronickém průmyslu. Jsou využívány v technologii pro řezání, svařování, značení, gravírování, vrtání atd.

Výhodami jsou vysoký výkon, jednoduchá konstrukce.

Mezi nevýhody patří nízká účinnost (pod 5 %), nesnadné chlazení.

#### Diskový laser [9],[24],[25],[27],[50]

Pracují obdobně, jako Nd: YAG lasery. Aktivní prostředí těchto laserů tvoří malý tenký disk. Disk je na obr. 9.



Ten má tloušťku v rozmezí desetin milimetru až sta milimetrů. Diskové lasery se užívají při výkonově náročných operacích jako je řezání a svařování kovů. Výkon laseru může být nastaven dvěma způsoby. Buď je udáván výkonem čerpacího zdroje, čerpací zdroj je složen z diskretních diodových modulů. Uzpůsobením modulů je získáván požadovaný výkon na disk. Druhým způsobem je zařazení disků do série, tím se dosáhne výstupního výkonu až 16 kW.

Výhody: vhodný pro kovy vysoké kvality, vysoký výkon s kvalitou paprsku, vysoká světlost, možnost změny velikosti plochy průřezu paprsku

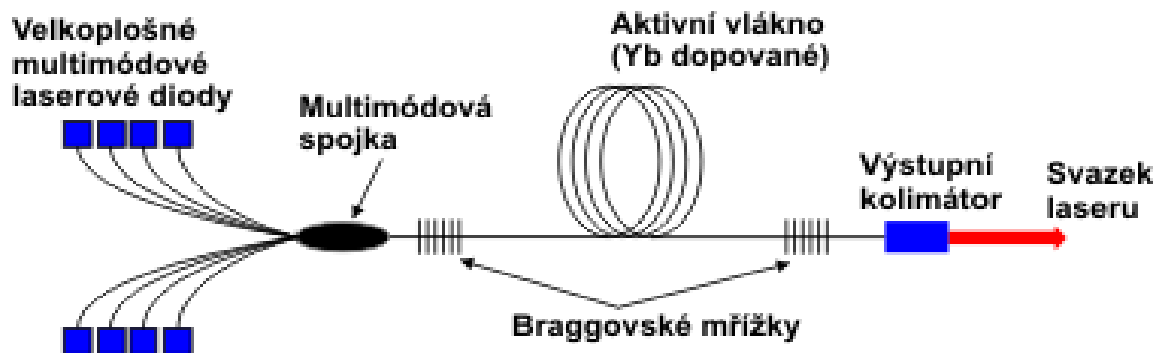
Obr. 9 Schéma aktivního prostředí diskového laseru. [25]

umožňuje změnu výkonu, vylučování problémů se zpětným odrazem.

Nevýhodou diskových laserů je jejich nižší účinnost (kolem 15-20 %) a menší životnost než u vláknových laserů.

#### Vláknový laser

První vláknové lasery byly navrženy už v roce 1960 a vlákno mělo jádro dopované neodymem. Aktivním prostředím dnešních vláknových laserů je dlouhé optické vlákno, které je dopované atomy vzácných zemin yterbiem, erbiem, thuliem. Vláknové lasery jsou koherentní optické zesilovače se zpětnou vazbou. Buzení zajišťují laserové diody a je vedeno přes optickou spojku, navazující na optické vlákno. To může být dlouhé i několik metrů a je svařeno s přenosovým vláknem. Namísto zrcadel jsou v laseru Bragovské mřížky – struktury přímo na optickém vlákně. Záření následně vyvazuje optický kolimátor. Vlnová délka je 1070 nm. Schéma laseru je na obr. 10.



Obr. 10 Vláknový laser s vláknem dopovaným yterbiem. [50]



Vláknové lasery můžeme rozdělit dle provozu na dva základní typy:

- Kontinuální
- Pulzní

Díky buzení LED zdroji záření, které jsou chlazené vzduchem a jednoduchostí celé konstrukce, mají vláknové lasery nízké provozní náklady. Jejich účinnost dosahuje 30-35 % a jejich životnost se pohybuje do 100 000 hodin. Laser je tvořen moduly, jejichž spojováním se dosahuje výkonů až 80 kW. Vyznačují se robustností a modularitou, malými prostorovými nároky, kvalitou laserového svazku, nízkými nároky na provoz a údržbu.

Nevýhody souvisí s technologií výroby vláken a některými fyzikálními jevy. To zabraňuje dosahovat vyšších výkonů na metr vlákna. Proto se používá paralelní řazení více vláken za účelem zvýšení výkonu. To ovšem vyřazuje jednobodový provoz, což snižuje „K“ faktor výstupního svazku.

Vláknové lasery se v současné době nejvíce používají v oblastech telekomunikace. Kromě typických využití v technologii jako je svařování, řezání, vrtání, navařování, pájení se užívají i pro topografické skenování, v metrologii, radarové systémy, spektroskopii.

### 3.1.2 Kapalinové lasery [15],[39]

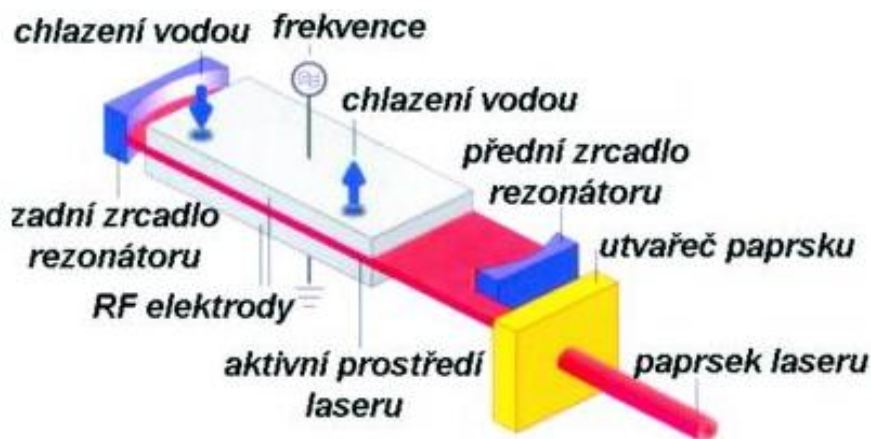
Pracují s cheláty (stabilní komplexy tvořené železitým kationtem s organickými látkami humusu udržující železitý kation v rozpustné formě) různých prvků vzácných zemin. Další dnes používanou skupinou jsou barvivové lasery, které pracují s roztoky různých organických látek. Díky různým kombinacím lze vytvořit světlo všech vlnových délek o rozsahu 300 nm až 1500 nm. Barvivové lasery se užívají hlavně ve spektroskopii a informační technice.

Mohou zabírat neomezený objem a jsou dokonale homogenní. Lze měnit jejich vlnovou délku, jsou přeladitelné.

Nevýhodami těchto typů laserů je krátká životnost, způsobená chemickým rozkladem aktivního prostředí.

### 3.1.3 Plynové lasery [2],[15],[21],[24],[39]

Tyto lasery využívají jako aktivní látku plyny, či směsi plynů a par. Dle použitého režimu mohou dosahovat výkonů od mW po stovky kW. Režimy jsou kontinuální nebo impulzní. Vlnová délka záření zahrnuje oblast od ultrafialového záření přes viditelné, infračervené, podmilimetrové a milimetrové. Plynové lasery se staly perspektivní, díky tomu že je možno kontrolovat objem plynu. Regulací je možné zvětšovat přítok a dodávat stále aktivní prostředí. Nabuzení probíhá elektrickým výbojem v zředěném plynu, či optickým nabuzením. Vlastností plynových aktivních látek je optická homogenita (stejnorodost) prostředí. Princip plynového laseru je na obr. 11.



Obr. 11 Schéma principu plynového laseru. [24]

Základní dělení plynových laserů:

- s výbojem v plynu,
- s přímým čerpáním,
- dynamické,
- chemické,
- excimerové.

Přeměna elektrické energie ve výboj je hospodárnější, takže plynové lasery mají větší účinnost. Pracují nepřetržitě, ale jejich výkon je nízký.

### CO<sub>2</sub> laser

Patří mezi molekulové lasery, jsou jedním z nejstarších typů plynových laserů. Plyná směs (aktivní prostředí) používaná v CO<sub>2</sub> laserech je tvořena oxidem uhličitým, dále Heliem pro zabezpečení disipace tepla a dusíkem, ve kterém výboj vytváří energii nutnou pro nabuzení. CO<sub>2</sub> lasery emitují světlo na úrovni infračerveného záření o vlnové délce 10,6 nm. Díky velikosti trubice podávají vysoké výkony. Mají energetickou účinnost přibližně 10 až 15 %. Pro v současnosti používané lasery se rozptyl tepla dosahuje užitím tepelných výměníků, přes které je plyn čerpán.

CO<sub>2</sub> laser užívá pro svou činnost vibračně-rotační přechody molekul. Molekula CO<sub>2</sub> je trojatomovou lineární molekulou vibrující na třech vibračních módech. První mód  $v_1$  představuje symetrické vibrace podél osy spojující atomy. Druhým módem  $v_2$  jsou deformační vibrace. Mód  $v_3$  představují asymetrické vibrace podél meziatomové osy. Energie CO<sub>2</sub> molekul se čerpá pomocí molekuly N<sub>2</sub>.

Konstrukce CO<sub>2</sub> laseru závisí na přítoku pracovního plynu. Díky tomu je více řešení. Pro praxi se využívají typy výbojek:

- lasery s výbojkou,
- lasery s pomalým průtokem plynu,
- lasery s rychlým průtokem plynu.

Hlavní předností je velká účinnost 10 až 20 % a velké výkony (až desítky kW). Lasery mají velkou spolehlivost a vysokou životnost, nízké provozní náklady.

Nevýhodou CO<sub>2</sub> plynových laserů je, že nelze záření vést optickým vláknem. Je proto nutné pro vedení paprsku použít zrcadla. Proto je optická dráha složitější, to vyžaduje časté kalibrace a z toho vyplývající nároky na údržbu zařízení jsou vyšší. Kvůli velké vlnové délce dochází reflexi paprsku a většímu rozměru stopy fokusovanému paprsku.

Lasery se používají pro popisování součástí, gravírování, řezání nekovů, kdy nejdou užít lasery s délkou vlny 1 μm, na nanášení povlaků, svařování kovů, vrtání a tepelné zpracování.

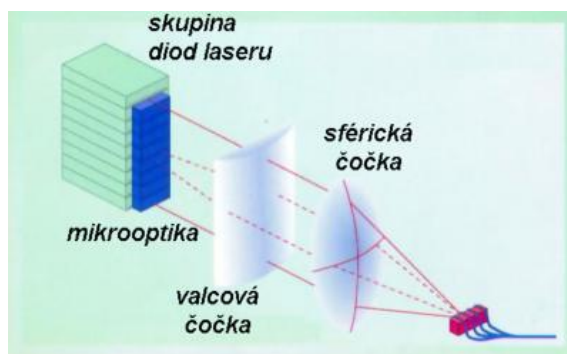
#### 3.1.4 Polovodičové lasery [15],[42]

V dnešní době se jedná o nejvyužívanější lasery. Základem je polovodičová dioda velmi malých rozměrů. Diodový laser je na obr. 12.

Aktivní prostředí – polovodičový materiál obsahuje aktivní nerovnovážné elektrony a volné nosiče náboje, které mohou být injektovány.

Výhodou polovodičových laserů je malá dioda (kompaktnost). Jejich účinnost, může dosahovat až 50 % a výkon se dá lehce korigovat změnou elektrického proudu.

Nevýhodou laserů je rozbíhavost generovaného záření, způsobeného velikostí diody.



Obr. 12 Schéma diodového laseru. [42]

Závislost parametrů vytvořeného záření na teplotě aktivního materiálu.

Představiteli polovodičových laserů jsou:

- polovodičový laser buzený svazkem elektronů (diodový) – aktivní prostředí vytváří blok polovodičů.
- injekční polovodičové lasery – aktivní materiály jsou polovodiče, které vytvářejí tzv. P-N přechod.

Laserové diody se užívají ve výpočetní technice. Lasery se využívají k popisování, řezání, svařování a pro technologie Rapid Prototypingu.

## 4 LASEROVÉ TECHNOLOGIE

[2],[15],[18],[20],[22],[29],[31],[34],[40],[41],[43],[46],[50],[51]

Od svého vzniku se lasery v strojním průmyslu značně rozšířili a využívají se pro mnoho různých operací. Lasery se využívají hlavně pro:

- svařování,
- řezání,
- vrtání,
- tepelné zpracování,
- značení,
- gravírování,
- nanášení povlaků.

Jejich hlavní výhodou je práce bez kontaktu s materiálem, možnost opracovat obtížně přístupné části materiálu a opracování z hlediska technologického.

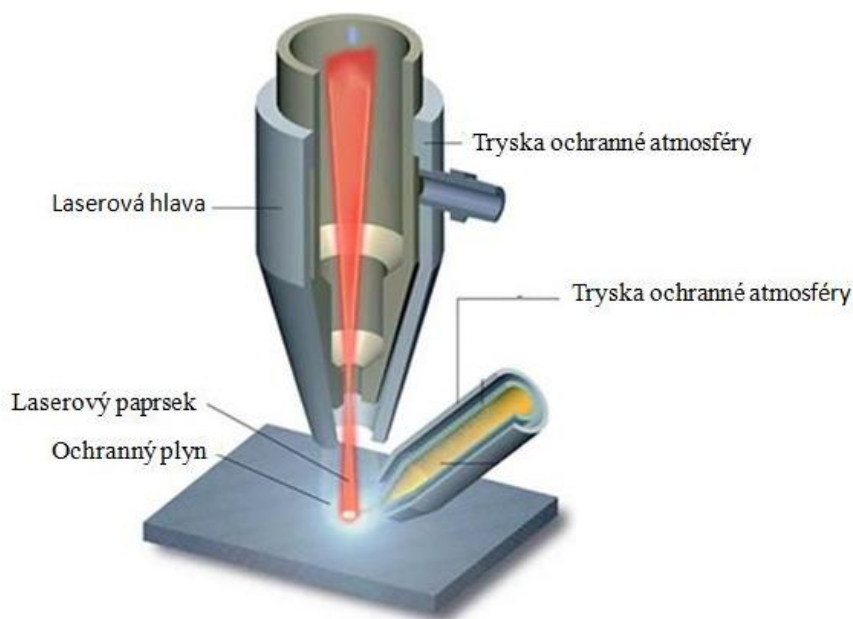
### 4.1 Svařování [2],[18],[22],[29],[31],[40]

Sváření patří k náročným operacím laserového paprsku. Svarové spoje musí splňovat mnoho požadavků a přitom docílit co nejužšího a nejhlubšího závaru. Svařuje se bez přídavného materiálu. V tabulce 1 je uvedeno porovnání různých metod svařování.

Tab. 1 Srovnání metod [31]

Metoda	Hustota energie [W/cm <sup>2</sup> ]	Hloubka průvaru [mm]	šířka/hloubka svaru [mm]	Svařovací rychlost [m/min]
Laser	107 - 109	10	0,1-0,5	10
Plamen	103	3	3	0,01
El. oblouk	104	4	2	0,5 - 3
Plasma	106	6	1	0,5 - 5
El. paprsek	108	50	0,03	0,5 - 5

Při laserovém svařování je paprsek zaměřen do úzkého svazku a zaostřen do ohniska miniaturních rozměrů. V ohnisku je vysoká koncentrace výkonu. Principem svařování je, že materiál je v místě dopadu paprsku ohřát mnohonásobně víc, než kolik tepla je odvedeno do okolí. Tak dojde k lokálnímu ohřevu dané oblasti do teploty varu. Svařování je na obr. 13.



Obr. 13 Svařování laserem. [18]

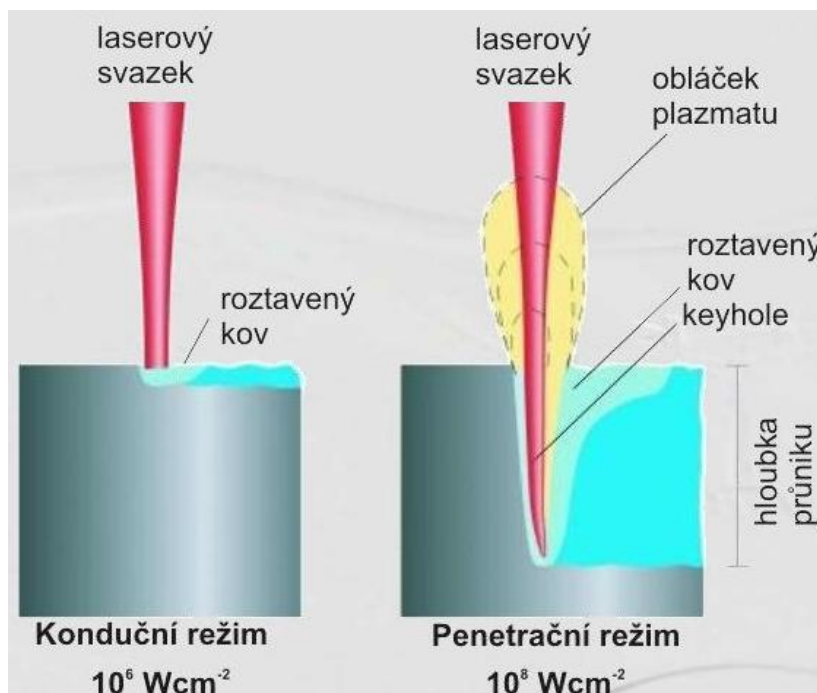
Svarový spoj lze laserem vytvořit v zásadě dvěma způsoby:

- kondukčním svařováním,
- penetračním svařováním.

#### 4.1.1 Kondukční svařování [22],[31]

Užívá nízké opakovací frekvence pro hustoty výkonu menší než  $10^6 \text{ W/cm}^2$ , kdy dojde jen k minimálnímu odpaření materiálu. Mezi jednotlivými pulzy svarová lázeň tuhne. Svarová housenka je tak tvořena za sebou jdoucími překrývajícími se body. Svary jsou široké a ploché. Hloubka průniku svazku závisí na tepelné vodivosti materiálu. Pulzní svařování se užívá pro tenké plechy, malosériovou a kusovou výrobu.

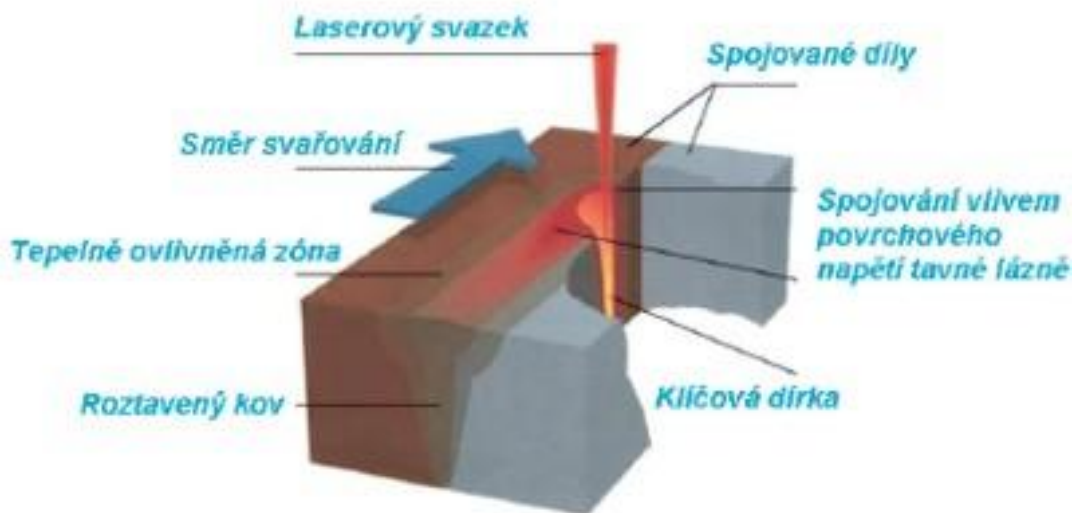
- Pro svařování je nutné dodržet kolmost dopadu paprsku na povrch, ochránit optiku, mít konstantní posuvovou rychlost a odstup.
- Výhodami laserového svařování oproti klasickým metodám jsou kvalita svaru, velký průvar, menší tepelně ovlivněná oblast, produktivita, snadná automatizace, vzhled povrchu.
- Nevýhodami jsou cena a určení pro velkosériovou výrobu.
- Obě metody nastavení laserového svazku jsou uvedeny na obr. 14.



Obr. 14 Svařovací režimy laserového paprsku. [31]

#### 4.1.1 Penetrační svařování [22],[31],[40]

Využívá vysoké hustoty výkonu v místě dopadu (hustota výkonu záření nad  $10^6 \text{ W/cm}^2$ ) pro vznik tzv. „klíčové dírky“ (anglicky key hole) ta je znázorněna na obr. 15. Jde o otvor kuželového tvaru s průměrem odpovídajícím takřka průměru paprsku, který je vyplněn parami a plyny roztaveného kovu – produkty tavení, odpařování, sublimace a metalurgické reakce taveného kovu s atmosférou prostředí. Kvůli vysokým teplotám probíhají i dislokační procesy. Tepelná interakce svařovaného materiálu probíhá na čelní stěně dírky ve směru pohybu paprsku. V důsledku dynamické rovnováhy tlaku plynů, par a tekutého kovu v klíčové dírce se roztavený kov přesouvá do zadní části svaru. Tam se tavenina kovu kumuluje, rychle krystalizuje a vzniká svar. Do svaru je přiváděna ochranná atmosféra určená k zabránění oxidace a pórovitosti. Laserový svar má dobrý poměr mezi hloubkou a šířkou průvaru.



Obr. 15 Princip klíčové dírky. [40]

#### 4.1.2 Svařovací parametry [2],[31],[40]

Jednoznačně ovlivňují kvalitu svaru. Podmiňují efektivnost využití laseru na technologické procesy. Jedná se hlavně o výkonové parametry, parametry fokusačního systému a pomocné parametry.

**Kontinuální režim sváření** – jedná se o tyto základní parametry:

- výkon laserového paprsku  $P$  [W] – teplotní parametr, vyjadřující vliv paprsku na materiál v procesu sváření,
- rychlost sváření v  $[\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}]$  – označuje dráhu projetou zdrojem ohřevu v dotyku s materiálem za jednotku času. Při konstantní hodnotě výkonu uvádí množství energie dodané materiálu,
- doprovodné parametry – dodaná energie, hustota výkonu, typ použitého ochranného plynu.

**Impulsní režim sváření** – jde o parametry:

- energie impulsu  $E_i$  [J] – základní energetická charakteristika, ovlivňuje proces sváření,
- maximální výkon impulsu  $P_{\text{max}}$  [W],
- střední výkon paprsku  $P_{\text{str}}$  [W],
- délka impulsu  $\tau$  [s] - popisuje čas působení paprsku a čas ohřevu a tavení kovu,
- frekvence impulsu  $F$  [Hz],
- průměr fokusačního paprsku  $d$  [mm],
- poloha ohniska vůči povrchu materiálu  $s$  [mm],
- rychlost sváření v  $[\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}]$  – pouze při švovém, či periodickém impulsním svařování.

#### 4.1.2 Příprava svarových ploch [2],[31]

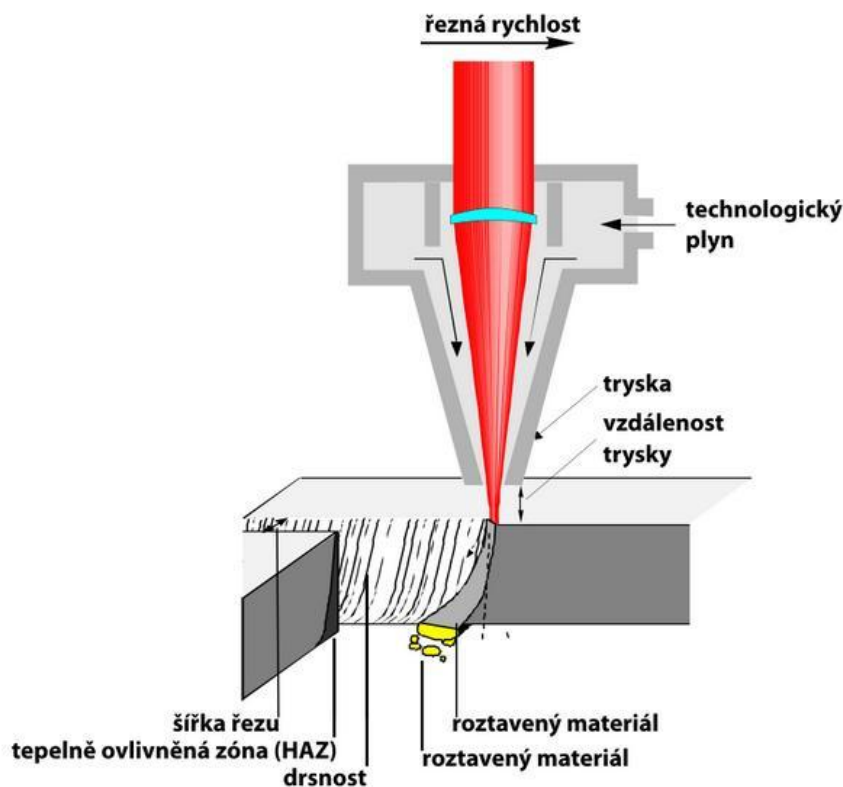
Energie paprsku se absorbuje na povrchu a proniká dovnitř vedením tepla. Svařování závisí na uložení svařovaných součástí a na kvalitě jejich povrchu.

Na čistotu svarových ploch nejsou kladeny velké požadavky. Například při svařování drátů s izolací se izolace neodstraňuje, sama se při sváření odpaří. Povrch materiálu lze přizpůsobit opracováním. Výhodné jsou některé kovové povlaky, zdrsňování povrchu či zoxidovaný povrch. Pro svařování se užívá polohových tolerancí.



## 4.2 Řezání [41],[50]

Jde o nejrozšířenější laserovou technologii. Díky vysoké hustotě výkonu dojde k prudkému ohřevu materiálu, natavení a odpaření po dopadu svazku. K odstranění taveniny, oxidů a výparů se využívají asistenční plyny působící koaxiálně (souose) s paprskem. Pro většinu nekovových materiálů je tímto plynem stlačený vzduch nebo na zabezpečení tepelného příkonu kyslík. Dále se pro řezání užívá dusíku u speciálních materiálů argon. Řezání laserem je znázorněno na obrázku 16.



Obr. 16 Řezání laserem. [50]

Při vlastním řezání dochází ke třem různým procesům:

- sublimační řezání – materiál je z místa řezu odpařován,
- tavné řezání – dochází pouze k natavení materiálu, který je vyfukován plynem,
- řezání plamenem – pro běžné a konstrukční oceli se kvůli vysoké řezné rychlosti jako plyn používá kyslík.

Řezná mezera je obvykle široká 0,1 až 1 mm.

Výhodami řezání laserem jsou vysoká řezná rychlost, kolmost řezu a vysoká přesnost.

Nevýhodou je, že záleží na hustotě energie. Takto jsou jednotlivé lasery omezeny řezatelnou tloušťkou materiálu.

## 4.3 Vrtání laserem [15],[50]

Využívá vysoké teploty k odpaření materiálu v místě vrtu. Intenzita svazku musí být mnohem větší, než je tomu u řezání. Využívají se proto výkonné pulzní lasery s délkou impulsu menší než je 1 ms. Zkrácení doby samotného pulsu však není dostatečné, musí se aplikovat i vhodná metoda vrtání. Vrtat je možné jednotlivými opakovanými pulzy, vyřezáváním díry apod. Největší možné dosahované hloubky řezání jsou do 50 mm. Lasery jsou vrtány kovové materiály nebo keramika.

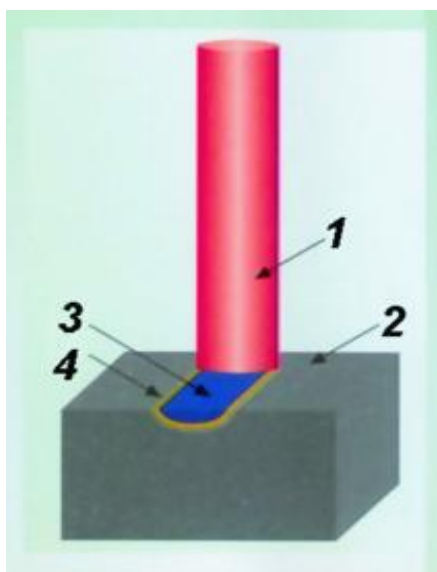
Výhodami laserového vrtání jsou rychlost, přesnost, bezkontaktnost. Dále pak rychlé chlazení a vrtání v těžce dostupných místech.

#### 4.4 Tepelné zpracování [43],[51]

U strojních součástí jsou často kladeny různé požadavky na povrch výrobku a jeho jádro. Jádro musí běžně odolávat mechanickému namáhání, ale povrch korozi či opotřebení. To umožňuje funkční zpevnění ploch součástí laserem. Kalení laserem je ukázáno na obr. 17.

Tepelné zpracování laserem charakterizuje krátká doba ohřevu a malý objem ohřátého materiálu. Metody tepelného zpracování můžeme rozdělit na:

- ohřev materiálu – kalení, žhání, popouštění,
- tavení povrchu materiálu součásti – tepelné zpevnění s natavením, amorfizace povrchu,
- odpařování materiálu – rázové zpevnění.



1 - Paprsek laseru,

2 - neovlivněný povrch,

3 - zakalený materiál,

4 - tepelně ovlivněná oblast.

Obr. 17 Kalení laserem. [43]

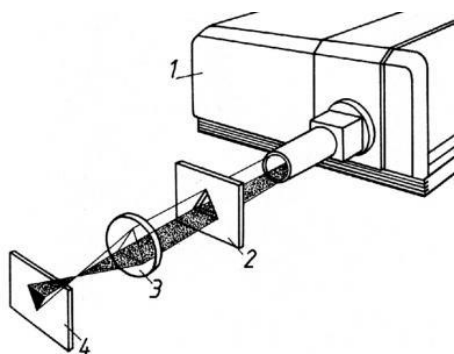
Tepelné zpracování je použitelné pro ocel a slitiny s obsahem uhlíku nad 0,3 %. Při kvalitním provedení se životnost součástí může zvýšit až o 50 – 400 %. Kalení je tepelné zpracování využívající k rychlému ohřevu optické záření laserů.

Výhodou oproti jiným způsobům ohřevu je zpracování na jinak nepřístupných místech, není zapotřebí chladicí médium, tepelné zpracování může být konečnou operací, malé tepelně ovlivněné pásmo téměř vylučuje deformace. Zpravidla se používá kontinuálních CO<sub>2</sub> laserů o výkonu několika tisíc wattů. Kalí se hřídele, drážky v díře, dosedací plochy, pístové kroužky, ozubená kola apod.

#### 4.5 Značení a popisování [43],[51]

Jedná se o jeden z nejuniverzálnějších laserových procesů. Značení pracuje na principu lokálního odpaření materiálu nebo na změně barvy povrchu. Na povrchu materiálu je s vysokou přesností vytvořen stálý, mechanicky odolný a kontrastní popis. Laser prochází šablonou, ve které jsou vyříznuté potřebné tvary. Při dopadu na materiál je vytvořen obrazec. Princip metody je na obr. 18. Tato metoda se dnes již takřka nevyužívá je již na ústupu.

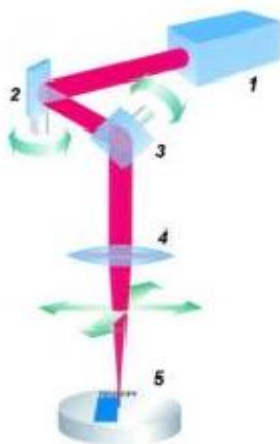




- 1- Laser,
- 2- maska,
- 3- objektiv pro zaostření paprsku,
- 4- obrobek.

Obr. 18 Popisování součásti přes masku. [43]

Jiným způsobem je pohyb laseru či materiálu na místa, kde mají být znaky. Tato metoda je na obr. 19. Vše probíhá v jediné operaci bez chemických přísad či inkoustů nebo mechanických zásahů do struktury materiálu. Výška znaků jde do milimetrů, odpařené vrstvy jsou v řádech mikrometrů.



- 1 – Laser
- 2, 3 – vychylovací zrcátko,
- 4 – objektiv,
- 5 – obrobek.

Obr. 19 Popisování vychylováním paprsku. [43]

Laserem lze značit kalené i nekalené oceli a polovodičové materiály, keramiku, litiny, drahé kameny, kůži, sklo atd. Povrch určený k popisu může být broušený, černěný, povlakovaný, pískovaný atd. Lze popisovat válcové, rovinné i zakřivené plochy na součástech v málo přístupných místech.

#### 4.6 Gravírování [43],[51]

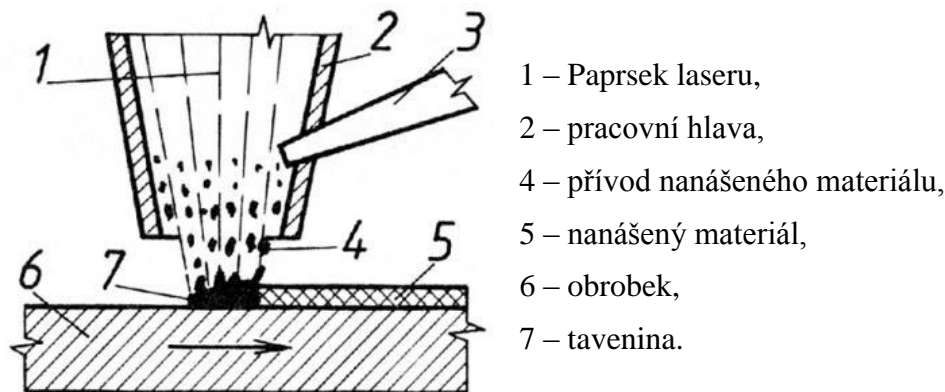
Laserové rytí neboli gravírování. Přenastavením parametrů laseru lze přecházet od popisu povrchu ke gravírování do větší hloubky. Principem metody je odpaření materiálu v místě působení paprsku laseru. Gravírování se využívá pro popisování jednoduchými i složitými reliéfy, převážně do kalených ocelí, gumy, dřeva atd. Některé gravírované součástky jsou na obr. 20. Nejpopulárnějšími lasery pro gravírování jsou Nd: YAG lasery.



Obr. 20 Výrobky gravírované laserem. [43]

#### 4.7 Nanášení povlakování [34],[43]

Nanášený materiál je do paprsku laseru přiváděn definovaným způsobem v ochranném plynu ve formě drátu nebo prášku. Přídavný materiál je volen tak, aby splňoval požadované vlastnosti – zvýšení korozní odolnosti, otěru vzdornosti apod. Paprsek laseru nataví nanášený materiál i povrch obrobku a dojde k metalurgickému spojení a ztuhnutí. Tak vzniknou pásy naneseného materiálu, které se překrývají. Povlak může vzniknout reakcí nataveného materiálu s plynem přiváděným do místa řezu. Na povrch obrobku může též být předem nanesen materiál tvořící povlak, který je poté roztaven obr. 21.

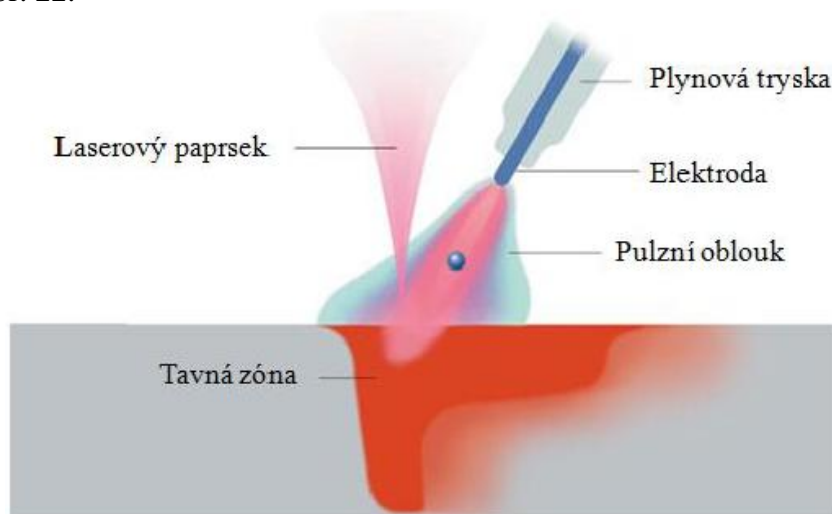


Obr. 21 Nanášení povlaků laserem. [43]

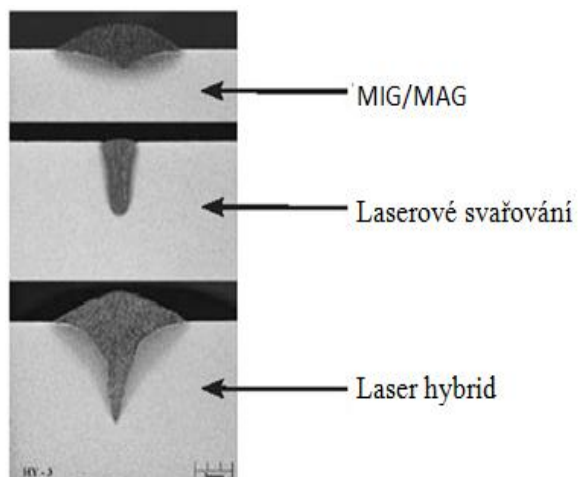
Při nanášení je vnesené teplo laserem nižší než při užití svazku plazmy nebo elektrického oblouku. To se projevuje menšími deformacemi, jemnější mikrostrukturou a vyššími tvrdostmi. Povlaky jsou dobře přilnavé k povrchu a jsou bez trhlin. Povlak může mít tloušťku od desetin milimetru až do dvou milimetrů.

#### 4.8 Hybridní laserové svařování [20],[46]

Svařování laser hybridem je kombinací dvou různých svařovacích metod za účelem dosažení optimální kvality svaru a svařovací rychlosti, při potlačení nedostatků jednotlivých metod s využitím jejich předností. energii do tavné lázně dodávají oba zdroje současně. Nejprve postupuje paprsek laseru, který vytvoří svařovací vrstvu. Za ním následuje zařízení pro obloukové svařování ve vzdálenosti jednoho až několika milimetrů. Princip metody je zobrazen na obr. 22.



Obr. 22 Princip metody laser hybrid. [46]



Využívány jsou tyto kombinace:

- laser – TIG,
- laser – MIG/MAG,
- laser plazmové svařování.

Svary vzniklé metodou laser hybridem, MIG/MAG a laserovou technologií jsou znázorněny na obr. 23.

Systém umožňuje rychlejší svařování a odstranění trhlin a prasklin. Díky podavači drátu MIG/MAG je možno do svaru vpravit další materiál.

Obr. 23 Kombinace laseru a MIG/MAG. [20]

Výhodami procesu je vysoká rychlost, kvalitní svarový spoj, to nejlepší z obou svařovacích procesů. Lze svařovat vysokolegované či nelegované povlakované oceli.

Laserové hybridní svařování se užívá v automobilovém průmyslu (svařování hliníkových karoserií), v lodním průmyslu, letecké technice, energetickém průmyslu atd.

## 5 HLINÍK A JEHO SLITINY [12],[20],[26],[28],[30],[37],[38],[45]

Poprvé se kov podařilo izolovat dánskému chemiku H. C. Oerstedovi reakcí amalgámu draslíku s chloridem hliníťým roku 1825. Jeho výroba však byla velmi nákladná. Teprve roku 1854 se francouzskému chemiku H. E. Sainte-Claire Deville najít způsob průmyslové výroby hliníku levně. Díky tomu se cena hliníku snížila. Deville poupravil název na aluminium, který se dnes všeobecně používá. Hledání jednodušší výroby hliníku pokračovalo a francouzský metalurg P. L. T. Héroult a Američan C. M. Hall tento způsob nezávisle na sobě roku 1886 objevili. Jde o průmyslovou výrobu elektrolyzou oxidu hliníťého rozpuštěného v kryolitu. Tento způsob výroby je základem dnešní výroby hliníku.

### 5.1 Hliník [26],[30]

Jedná se o třetí nejrozšířenější prvek v zemské kůře – 8,3 % a jde o nejrozšířenější kov. Hliník je vysoce reaktivní, v přírodě se nachází prakticky pouze ve sloučeninách. Chemická značka je Al, latinsky Aluminium. Jde o neušlechťilý stříbrošedý kov, který je nestálý, kujný, elektricky vysoce vodivý, měkký, nízké hustoty a korozi odolný. Základní vlastnosti hliníku jsou uvedeny v tab. 2.

Tab. 2 Vlastnosti hliníku [26]

<b>Atomové číslo</b>	13
<b>Atomová hmotnost</b>	26,98
<b>Skupenství</b>	pevné
<b>Krystalická struktura</b>	kubická plošně středěná
<b>Hustota</b>	2 700 kg/m <sup>3</sup>
<b>Magnetické chování</b>	paramagnetický
<b>Teplota tání</b>	660,32 °C
<b>Teplota varu</b>	2 519 °C
<b>Tepelná vodivost</b>	237 W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>

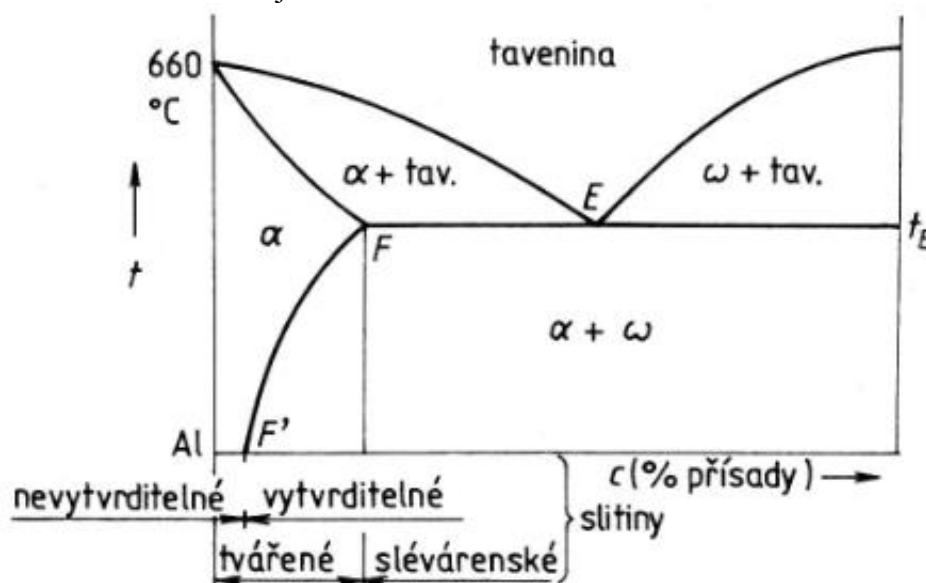
V čistém stavu je reaktivní, na vzduchu se pokrývá vrstvou oxidu Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Dalšími chemickými vlastnostmi je afinita (schopnost chemických látek slučovat se), nereaguje s vodou. V periodické tabulce, se nachází ve skupině III A. V přírodě, se vyskytuje pouze jeden izotop. V přírodě se nachází zhruba v 250 různých minerálech. Nejdůležitějšími jsou korund, diaspor, boehmit, kyanid, spinel a další. Nejvyužívanější rudou pro získání hliníku je bauxit. Tuna hliníku se získává ze čtyř až šesti tun bauxitu. Bauxit je v podstatě zbytková jílová hornina složená ze zbytkových hydroxidů.

V posledních desetiletích vzrůstá výroba a spotřeba hliníku. Důvodem jsou vlastnosti hliníku a jeho slitin. Důležitost hliníku a jeho slitin spočívá v možnosti vlivu změny chemického složení, tváření a tepelného zpracování na mechanické a další vlastnosti. Změn chemického složení se dosáhne nalegováním jednoho či více prvků. Tím dojde ke změně původních vlastností hliníku a jejich možnému zlepšení. Chceme měnit:

- pevnostní vlastnosti – příměsí dalších prvků (Cu, Mg),
- chemické vlastnosti – legováním,
- technologické vlastnosti – např. Si – siluminy,
- fyzikální vlastnosti.

## 5.2 Slitiny hliníku [12],[26],[30],[37]

Základní dělení slitin hliníku je zobrazeno na obr. 24. Rozdělení slitin hliníku.



Obr. 24 Rozdělení slitin hliníku. [12]

Hliník a jeho slitiny pro tváření jsou v současné době označovány hlavně dle norem ČSN EN 573-1,2,3. Značení doplňuje čtyřmístná, popřípadě pětímístná číslice. Toto značení doplňuje chemické označení. To sestává z chemických značek následovaných čísly udávajícími čistotu hliníku, či obsah příslušného prvku. Číselné značení může vypadat např. EN AW-5052 [AlMg2.5]. Znaky v značení označují:

- EN (evropská norma) s mezerou,
- A značící hliník,
- W udávající tvářené výrobky,
- spojovací čárka,
- číslice značící chemické složení.

### 5.2.1 Hliníkové slitiny pro tváření [26],[30]

Hliníkové slitiny pro tváření se dělí dle EN ČSN 573-1 do skupin podle jejich hlavního legujícího prvku. V čtyřmístném značení udává první číslice skupinu slitin podle hlavních slitinových prvků:

řada 1000 – Al minimálně 99%  
řada 3000 – slitina AlMn  
řada 5000 – slitina AlMg  
řada 7000 – slitina AlZn

řada 2000 – slitina Al-Cu  
řada 4000 – slitina AlSi  
řada 6000 – slitina AlMgSi  
řada 8000 – slitina Al s různými prvky

Od slitin se požaduje dobrá schopnost tváření za tepla i za studena. Užitím moderních technologií se aplikují i slitiny, u kterých to dříve nebylo možné.

**Třída 1000:** Užívají se tam, kde se požadují dobré fyzikální vlastnosti jako, tepelná a elektrická vodivost, odolnost vůči korozi. Uplatnění nacházejí v elektrotechnickém a chemickém průmyslu, energetice, obalové technice.

**Třída 2000:** Hlavní legující prvek je měď, sekundární Hořčík. Slitiny jsou tepelně zpracované. Mají špatnou korozní odolnost, proto se plátují fóliemi Al vysoké čistoty.

**Třída 3000:** Tepelně se nezpracovávají, mají lepší pevnostní vlastnosti než řada 1000. Užívají se pro výměníky tepla.

**Třída 4000:** Díky vysokému obsahu Si (do 12 %) se používají při sváření – svářecí dráty. Při eloxování jsou tmavě šedé.

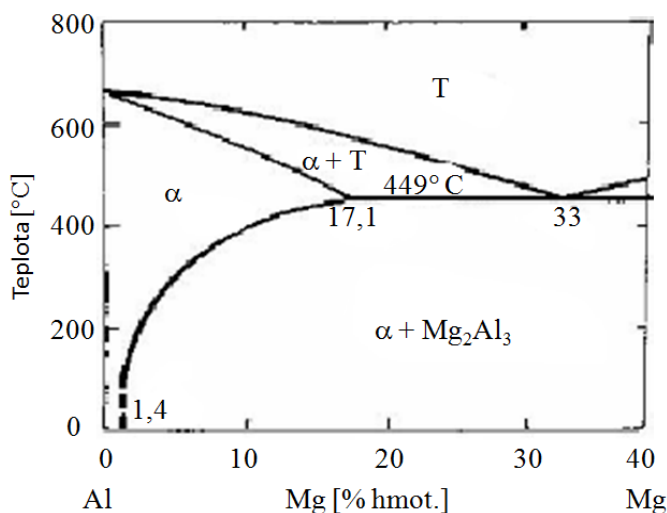
**Třída 6000:** Jejich pevnostní vlastnosti záleží na množství intermetalické fáze  $Mg_2Si$ , díky níž jsou slitiny tepelně zpracovatelné. Jsou charakteristické svou svařitelností, korozní odolností, schopností ke tváření a mechanickou obrobiteľností.

**Třída 7000:** Legující prvek je zinek v množství 1 až 8 %. S přítomností hořčíku dosahují po tepelném svařování nejlepších pevnostních vlastností ze všech hliníkových slitin. Při nejvyšších pevnostních vlastnostech mají špatnou odolnost vůči korozi.

### 5.2.2 Třída 5000 [26],[30],[37]

Patří také do hliníkových slitin pro tváření. Hlavní legující prvek je hořčík (Mg), jde tedy o slitiny Al-Mg. Do obsahu hořčíku 6 % mají slitiny dobrou korozní odolnost, s obsahem nad 6 % hořčíku dochází ke korozi na hranicích zrn. Tato situace nastává především při mechanickém zatížení, proto se většinou nepoužívají. Slitiny Al-Mg mají nízkou pevnost, ta se pohybuje od 140 až do 200 MPa. Pevnost se zvyšuje deformacím zpevněním – tvářením za studena. Takto lze dosáhnout až  $R_m = 400$  MPa. Při vyšších deformacích rapidně klesá tvárnost a korozní odolnost. Slitiny této třídy se nevytvrzují, i při rychlém ochlazení dojde pouze k malému stupni přesycení. Pevnost je při stárnutí zvýšena jen velmi málo.

Pro korozní odolnost zejména v mořské vodě se používají v lodním průmyslu. Dále v potravinářském průmyslu, architektuře, kryogenním průmyslu. Materiálový list hliníku třídy 5000 testovaného pro svařování je zobrazen v příloze číslo 1.



Obr. 25 Soustava Al – Mg. [30]

### 5.3 Sváření hliníku [28],[38],[45]

Svařování je proces, při němž dojde k nerozebíratelnému spojení součástí. V současné době, jsou nejpoužívanějšími metodami pro svařování hliníku a jeho slitin TIG/MIG metody, dále FSW a laser. Během tavby se do hliníku mohou dostat nečistoty. Ty mají vliv na mechanické vlastnosti a svařitelnost. Platí, že čím méně nečistot, tím lepší kvalita a vlastnosti.

Hliník a jeho slitiny způsobují při svařování jisté problémy vyplývající z charakteristických vlastností hliníkových materiálů. Tyto problémy, které je nutno před svařováním eliminovat se dají shrnout do následujících bodů:

- Hliník a jeho slitiny se na povrchu pasivují vrstvou  $Al_2O_3$  s bodem tání 2050°C, což je mnohem více než bod tání čistého hliníku 660°C.
- Vytvořená povrchová vrstva  $Al_2O_3$  je elektricky nevodivá.
- Hliník a jeho slitiny mají velkou tepelnou vodivost, která sťažuje podmínky při místním natavování.
- Hliník má nízký modul pružnosti oproti ocelím, může působit deformace v okolí svarů.
- Některé slitiny hliníku ztrácí nad 200°C pevnost.

- U tenkých vytvrzených plechů jsou v místě svaru a v TOO patrné poklesy pevnosti.
- Hliník a jeho slitiny mají v tekutém stavu schopnost rozpouštět vodík, tak vzniknou dutiny ve svarovém spoji.

Hliník a jeho slitiny se dodávají v tepelně zpracovaném stavu. Při svařování těchto slitin dojde při ohřevu nad 200°C k vyloučení nové fáze a dojde ke snížení pevnosti v tepelně ovlivněné oblasti.

Svařitelnost hliníku a jeho slitin se hodnotí dle pevnosti v tahu a chemického složení. Podmínkami pro svařování jsou:

- využití přídavného proudu – zajišťuje čistící účinek,
- užití ochranného plynu (Ar, Ar + He),
- vhodné svařovací parametry,
- svary se dále tepelně nezpracovávají,
- vhodný přídavný materiál – podobného chemického složení jako základní.

Na každém hliníkovém materiálu vzniká vrstva  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , její celistvost a vazba se základním materiálem zajišťuje korozní odolnost. Tato vrstva způsobuje problémy při svařování. Zhoršuje podmínky natavení, formování svaru a tvorbu svarové lázně. U hliníkových materiálů se proto před svářením provádí odstranění této oxidické vrstvy. Tato příprava se provádí mechanicky (broušení), nebo chemicky (moření). Během sváření je nutné chránit svarovou lázeň a tepelně ovlivněnou oblast ochranným plynem, aby se zabránilo vzniku oxidické vrstvy.

### 5.3.1 Svařování metodou TIG [38],[45]

TIG = Tungsten Inert Gas. Jde o svařování wolframovou elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu (argon). Metoda svařování TIG se používá především pro tenké hliníkové plechy a je dobře kontrolovatelná z hlediska vstupních parametrů. Pro plechy s tloušťkou více než 12 mm je již pomalá a neekonomická.

Výhodou metody je dosahovaná kvalita svarů a operativnost při svařování v polohách. Dále jednoduchost obsluhy, kontrola vneseného tepla. Schopností metody je odstranění povrchových oxidů svým fyzikálním účinkem.

Před svařováním svarové plochy prochází přípravou broušením, nebo třískovým obráběním. Povrch se očišťuje mechanicky nebo chemicky.

Při svařování se užívají přídavné materiály. U nich je vyžadována stejná čistota hliníku jako u základního materiálu.

Ochranné plyny pro metodu TIG jsou hlavně plyny inertní, jako argon, helium a jejich směsi. Nastavováním různých poměrů v koncentraci směsi lze ovlivnit přenesené teplo.

### 5.3.2 Svařování metodou MIG [38],[45]

MIG = Metal Inert Gas. Pro ochranu oblouku je použit inertní plyn, technicky čistý argon či kombinace argon + helium.

Metoda je vhodná pro hliníkové slitiny typu Al – Mg, Al – Mn, Al – Si. Lze svařovat i vytvrditelné slitiny, je to však náročnější. Důvodem je tepelný režim svařování. Při teplotách nad 200 °C dojde k poklesu pevnosti. Vždy je nutno klást důraz na:

- volbu přídavného materiálu,
- užití vhodného ochranného plynu,
- případnou aplikaci předehřevu.

Výhodou metody oproti TIG je hloubka průvaru, rychlejší posuv a tudíž užší tepelně ovlivněná oblast. Také vyšší pevnost svaru a korozní odolnost, trvanlivost a menší tepelné ovlivnění. Tato metoda se preferuje pro svařování výrobků a plátů.



Přídavné materiály volíme obdobného chemického složení jako základní materiál. Pro svařování hliníku, jsou dodávány dráty plasticly deformované za studena. K vytvoření vhodného svarového spoje je nutno s drátem správně manipulovat při svařování. Musí být zabráněno znečištění drátu a jeho poškození, dále zajistit plynulost podávání drátu.

Stabilního hoření oblouku dosáhneme při 150 – 200 °C. U svařování slitin s nízkými plastickými vlastnostmi a pro svary o vysoké tuhosti se užívá přehřev. Při svařování může být užít zkratkový, sprchový i pulzní režim.

### 5.3.3 Svařování laserem [28],[45]

Využití energie monochromatického koherentního záření pro natavení materiálu, ve zfokusované formě, pro vytvoření svaru.

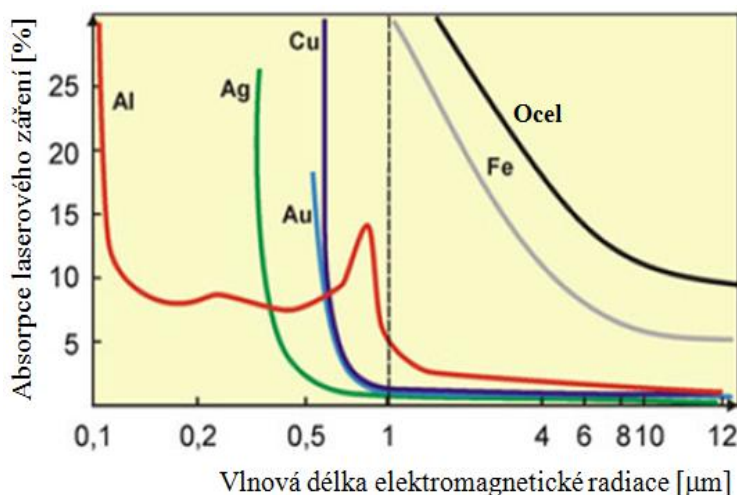
Oproti klasickým metodám nabízí jisté výhody. Jde o rychlost svařování, snadnou automatizaci, malou TOO, dosahovanou kvalitu spoje, možnost svařování při přístupu pouze z jedné strany.

V oblasti ocelí se již tato metoda osvědčila, avšak aplikace laseru při svařování hliníku a jeho slitin přináší jistá omezení, která je třeba řešit pro každou aplikaci. Hliník má vysokou hustotu volných elektronů v pevné látce, což z něho dělá jednoho z nejlepších reflektorů světla. Mimo to hliníkové slitiny často obsahují hořčík nebo zinek, které se snadno odpařují a vytváří plazmu blokující dopadající laserový svazek. Dalším omezením, které musí být vzato v úvahu při svařování hliníku je nízká absorpce energie, slitinové kompozitní rozdíly a důležitost přípravy povrchu. Absorpce energie se dramaticky mění v čase, vyvolává nestabilitu procesu se špatnou kontrolou penetrace a hrubý povrch kuliček (obecně se má za to, že rozdíl v podílu absorbované energie je způsoben tavením kovu).

Začátek svařovacího procesu je obtížný, protože hliník má vysoký odrazový koeficient laserové radiace. Tento koeficient absorpce kovů v závislosti na vlnové délce elektromagnetického záření je zobrazena na obr. 26 pro různé kovy.

Když se objeví tekutý kov, radiční absorpce vzrůstá (koeficient odrazu klesá), ačkoli zůstává na relativně nízké úrovni.

Pro svařování hliníku je široce užívána metoda klíčové dírky, je nezbytné zajistit správnou hustotu energie laserového svazku pro dosažení mezní hodnoty výkonu. Vznikne tak kapilára tvořená roztaveným kovem, plyny a párami. Kapilára je obklopena tenkou vrstvou roztaveného kovu. Laserové záření je absorbováno plyny v kapiláře a roztaveným kovem důsledkem mnohonásobných odrazů laserového paprsku od stěn kapiláry. Pro hliník a jeho slitiny je z důvodu větší tepelné vodivosti a vysoký koeficient odrazu laserového záření mezní hodnota výkonu asi  $1,5 \cdot 10^6$  (W/cm<sup>2</sup>). Výše uvedené požadavky přinášejí nutnost použití silnějších laserů než pro svařování oceli. Je nutno mít na paměti, že při svařování nízko výkonnými lasery existuje možnost odrazu laserového paprsku od povrchu obrobku zpět do optického systému. Tak můžou být svařovací hlava a laserová optika poškozeny. Odražené záření může projít zpět přes hlavu k rezonátoru. V extrémních případech může být rezonátor poškozen v důsledku nadměrného tepelného záření.



Obr. 26 Absorpce kovů. [28]

ných odrazů laserového paprsku od stěn kapiláry. Pro hliník a jeho slitiny je z důvodu větší tepelné vodivosti a vysoký koeficient odrazu laserového záření mezní hodnota výkonu asi  $1,5 \cdot 10^6$  (W/cm<sup>2</sup>). Výše uvedené požadavky přinášejí nutnost použití silnějších laserů než pro svařování oceli. Je nutno mít na paměti, že při svařování nízko výkonnými lasery existuje možnost odrazu laserového paprsku od povrchu obrobku zpět do optického systému. Tak můžou být svařovací hlava a laserová optika poškozeny. Odražené záření může projít zpět přes hlavu k rezonátoru. V extrémních případech může být rezonátor poškozen v důsledku nadměrného tepelného záření.



Laserové svařování hliníku se v průmyslu používá s odpovídajícími postupy, které zabráňují vzniku vad. V případě hliníku je v blízkosti kořene svaru velké množství pórů vyplněných párami. Vzhledem k výrazným rozdílům (20:1) rozpustnosti vodíku v kapalném a pevném hliníku, zůstává vodík v pasti. Použití ochranného plynu je řešením. Množství vodíku může být významně eliminováno frézováním povrchu a podtlakovým žíháním. Póry mohou také vznikat odpařováním legujících prvků, zejména hořčíku. U nestabilní klíčové dírky s tendencí tvořit „hrdlo lahve“ se zvyšuje úroveň pórovitosti. Hlavní nebezpečí přítomnosti vodíku je náchylnost k trhlinám za horka, které se tvoří během tuhnutí z tekuté fáze svarových kovů. Trhliny za horka jsou častější v případě hliníkových slitin s obsahem mědi. Lokální tavení je doprovázené segregací na hranicích zrn.

#### 5.3.4 Hybridní svařování hliníku [28],[45]

Jde o spojení dvou svařovacích procesů v jeden. Máme dvě hybridní metody:

- svařování laserovým paprskem a MIG oblouk,
- svařování laserovým paprskem a TIG oblouk.

**Laser a MIG** – působí na obrobek současně. Užívá se přídavného materiálu pro k vyplnění paty svaru, k opravě geometrie a redukci pnutí. Přídavný materiál slouží ke kompenzaci ztrát materiálu vypařováním. Postup kombinuje výhody metod – velkou hloubku průniku a rychlost, malé tepelné ovlivnění a malý stupeň distorze.

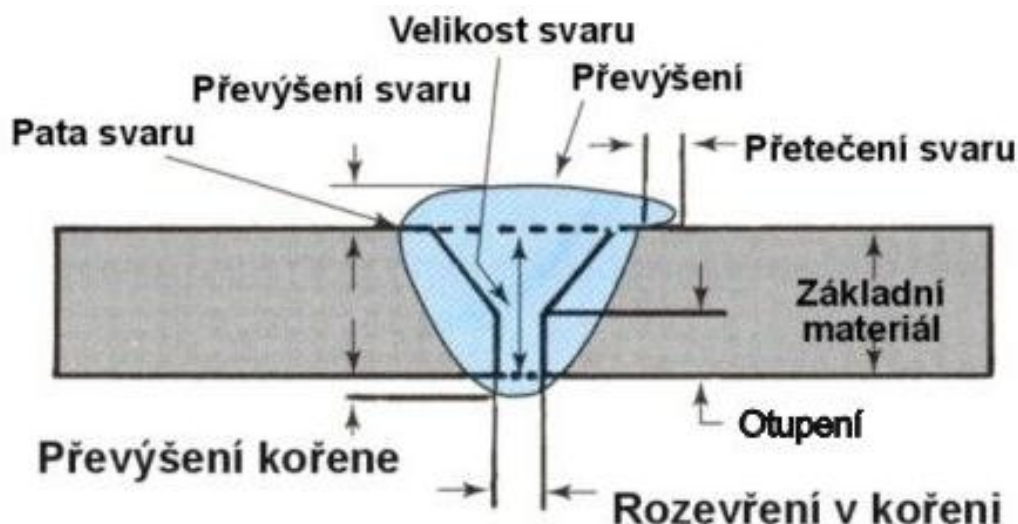
**Laser a TIG** – TIG hořák je v ose s osou laserového paprsku a směřuje do stejného bodu. Díky tomu se dosahuje vyšší stability oblouku, hloubky průniku a rychlosti. Elektrický oblouk ředí hustotu plazmatu laseru a snižuje nežádoucí odrazivost a absorpci energie paprsku. Dojde ke zvýšení tepelné účinnosti.

Výsledný svar je tedy ovlivněn množstvím proměnných. Je zapotřebí určit veškeré vstupní faktory a optimalizovat je pro dosažení nejlepších výsledků. Jedná se o výkon, frekvenci, šířku stopy paprsku, rychlost svařování, užití ochranné atmosféry, geometrii svaru, přehřev a dohřev materiálu. Dle kontroly vzniklého svaru se tyto parametry zpětně upravují.

## 6 SVARY [1],[3],[8],[14],[29]

Jedná se o nerozebíratelné spoje s materiálovým stykem. Svarový spoj je vytvářen za působení tepla, nebo tlaku, či kombinací obojího. Při svařování dojde ke spojení základního a přídavného materiálu v tekutém stavu. Nejčastěji se spojují kovové součásti.

Výhodami svařování je, že mez únavy svarového kovu je srovnatelná se základním materiálem, vady svarů lze dodatečně opravit. Na obr. 27 je svarový spoj vzniklý klasickými metodami svařování.

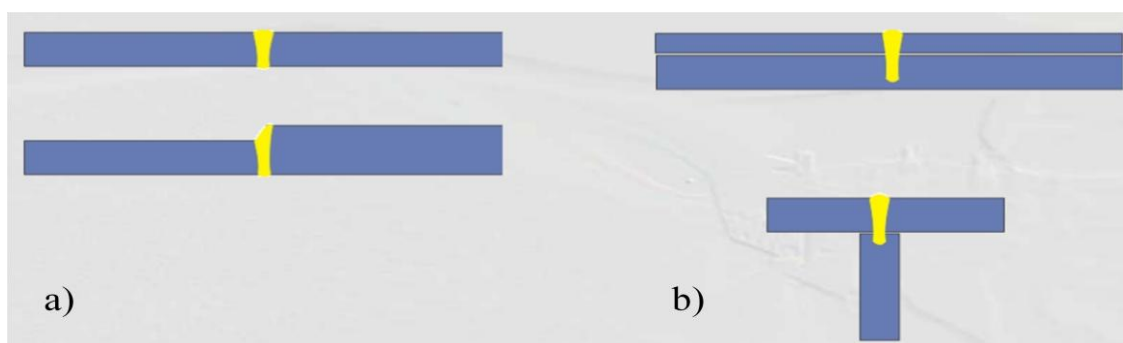


Obr. 27 Popis svaru. [14]

### 6.1 Typy svarových spojů [1],[29]

Typy svařovaných laserových svarů (obr. 28):

- a) natupo,
- b) průvarový.



a) natupo, b) průvarový,

Obr. 28 Typy svarů. [29]

**Svar natupo** – spojované součásti leží v jedné rovině. Nejčastěji slouží jako nosné a silové svary. Vzhledem k možnosti dokonalého provedení svaru je nutné provést úpravu stykových ploch. Typ úpravy je dán provedením spoje, tloušťkou materiálu, přístupností. Na pevnostní kontrole se svařenec posuzuje jako celek s nebezpečným místem v oblasti svaru.

**Průvarový svar** – umožňuje bodové spojování plechů vzájemně, nebo s libovolně tlustým dílcem z jedné strany. Jde o proválení otvoru a jeho následné zatavení. Nejsou vhodné pro namáhání. Spojují se maximálně tři součásti do tloušťky 15 mm.

Svařování na laseru probíhá bez přídavného materiálu.



Obr. 29 Dělení svarů. [29]

Dále se svary (obrázky 29) rozdělují na:

- c) lemový,
- d) koutový vnitřní,
- e) koutový vnější,
- f) překlátovaný,
- g) axiální,
- h) radiální.

**Lemový svar** – užívají se pro svařování velmi tenkých plechů tloušťky max. 2 mm.

**Koutový vnitřní a vnější** – situují se na klínové hrany, profilem je rovnoramenný pravoúhlý trojúhelník. Užívají se pro křížové a rohové spoje. Svařené součásti se nemusí tvarově upravovat.

**Překlátováním** – svařování překlátováním může být s částečným nebo úplným průvarem.

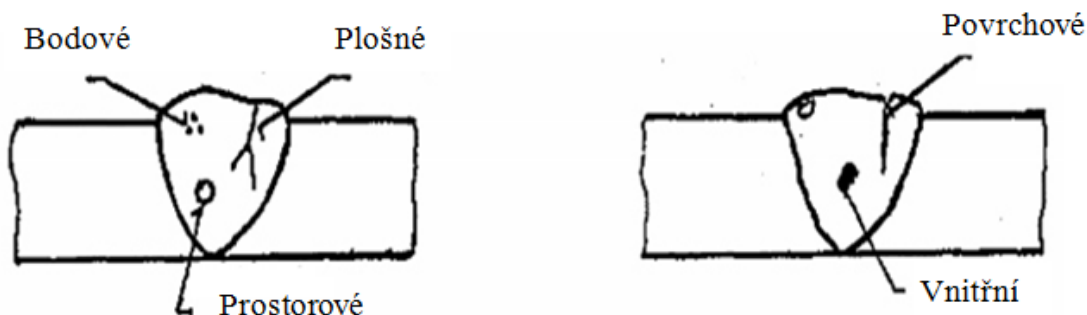
**Axiální svar** – je vytvářen ve směru osy obrobku.

**Radiální svar** – svařuje se kolmo na osu obrobku.

## 6.2 Svarové vady [1],[17]

Každý kovový materiál zhotovený běžnými postupy vykazuje vady. Ty mohou být různého tvaru, velikosti a charakteru. Tyto makroskopické a mikroskopické vady vykazují všechny technicky zhotovené materiály. Může jít o vady svarového kovu, tepelně ovlivněné oblasti i základního materiálu. Mnoho vad lze zjistit běžnými postupy. Makroskopické vady můžeme částečně ovlivnit správnou technologií svařování a tudíž ovlivnit i užité vlastnosti, které jsou jimi udávány.

Vady jsou odchylky od předepsaných vlastností. Vady mohou být *zjevné* (viditelné pouhým okem), nebo *skryté* (zjišťované laboratorními zkouškami). Dále jsou *přípustné* – jsou dovolené a jejich odstranění není nutné, a *nepřípustné* – neodpovídají povoleným hodnotám. Nepřípustné vady mohou být *opravitelné* nebo *neopravitelné*. Vady ve svarech dle tvaru a polohy jsou zobrazeny na obr. 30.



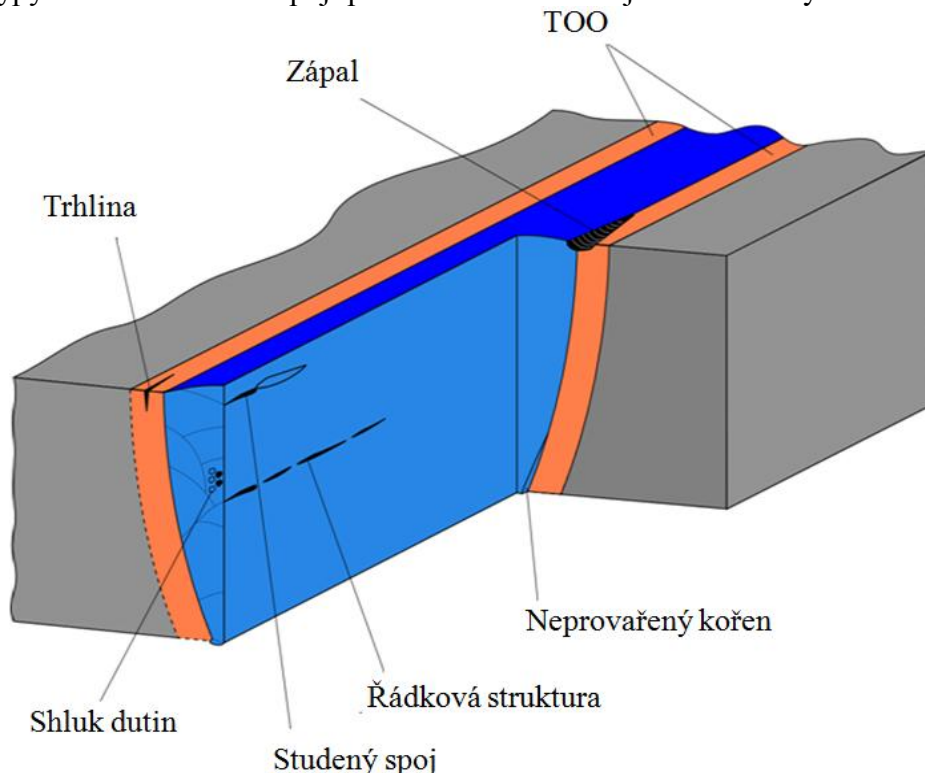
Obr. 30 Vady ve svarech dle tvaru a polohy. [44]

Problémy svařovacích procesů se týkají hlavně necelistvostí. Defekty svarových spojů můžeme rozdělit na:

- plošné – trhliny, neprůvazy, studené spoje. Vyvolávají vysoké koncentrace napětí v kořeni.

- objemové – póry, bubliny, vměstky, vruby, nepravidelnosti povrchu svaru. Jsou méně nebezpečné než vady plošné i v případě jejich shluku.

Základní typy vad ve svarovém spoji při tavném svařování jsou zobrazeny na obr. 31.



Obr. 31 Vady při tavném svařování. [1]

### 6.3 Dělení svarových vad [1],[17]

Svarové vady se rozdělují a popisují dle ČSN EN ISO 5817. Svary se dělí podle stupňů jakosti na:

- D – nízká kvalita,
- C – střední kvalita svarů,
- B – vysoká kvalita svarů.

Všeobecně se vady podle nebezpečnosti klasifikují od nejnebezpečnějších po méně nebezpečné: trhliny, studené spoje, neprovařený kořen, struskové vměstky, póry, bubliny.

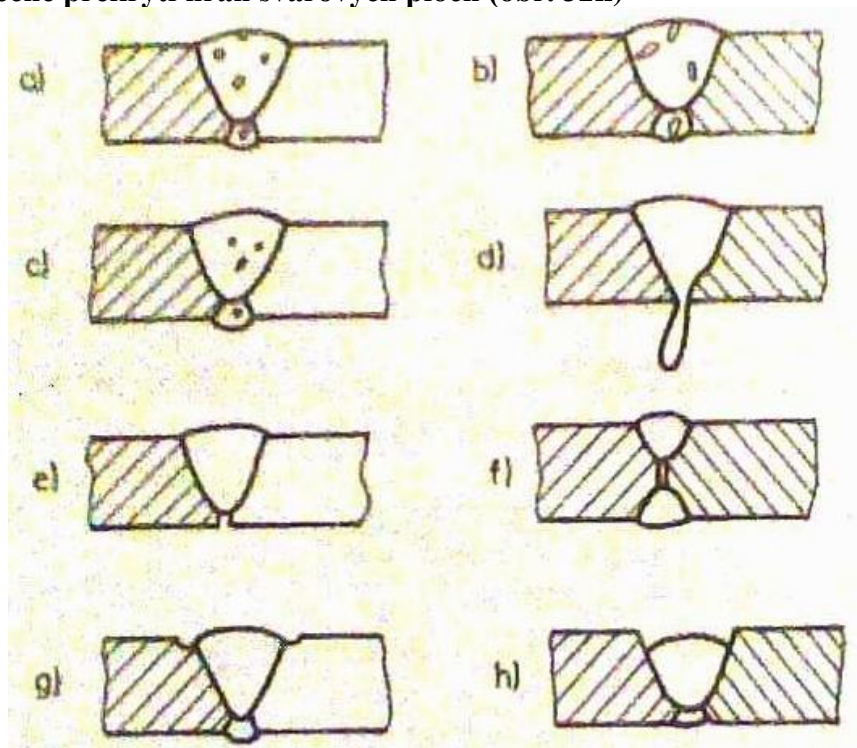
Vady svarových spojů můžeme tedy rozdělit na:

**Plynové dutiny** – shluk dutin, řádka dutin, bubliny (obr. 32a), póry (obr. 32b). Jedná se o objemové vady kulovitěho či protáhlého tvaru, vyplněné plynem. Vznik může být zapříčiněn nedostatečně vysušená elektroda, povrchové nečistoty na svarových plochách, rychlé svařování, rychlé tuhnutí lázně. Pro svařování laserem jsou typické především bubliny a řetěz bublin. V důsledku kmitání, se spodek „key hole“ uzavírá a bubliny zůstávají uvnitř.

**Vměstky (inkluze)** – struskové vměstky, nepravidelné různotvaré útvary uzavřené ve svarovém kovu. Vznikají nedokonalým odstraňováním strusky mezi svařovanými vrstvami. Oxidické vměstky vznikají hlavně následkem nedokonalého očištění povrchu. Vznikají hlavně u oxidů hliníku a hořčíku. Kovové vměstky (obr. 32c) vznikají následkem vysokých proudů, či porušením plynové ochrany. Patří sem také řádková struktura.

**Zápaly** – jedná se o ostrá natavená prohloubení na hranicích základního materiálu a svarové housenky. Zápaly (obr. 32g) se často vyskytují u koutových svarů.

### Nedostatečné překrytí hran svarových ploch (obr. 32h)



a) bubliny, b) póry, c) kovové vměstky, d) krápník, e, f) neprovařený kořen, g) zápal,  
h) nedostatečné překrytí svarových ploch.

Obr. 32 Vady svarových spojů. [1]

**Kořenové vady** – jako je neprovařený kořen svaru (obr. 32e, f) vznikající neúplným provařením svarových ploch. Do kořenových vad patří i prohloubený svar v kořeni a krápníky (obr. 32d).

**Studené spoje** – na svarové ploše (obr. 32e) vznikají nedokonalým tavným spojením svarového kovu a základního materiálu. Mohou vzniknout při velké rychlosti svařování. Studené spoje mohou vzniknout i mezi vrstvami (obr. 32f).

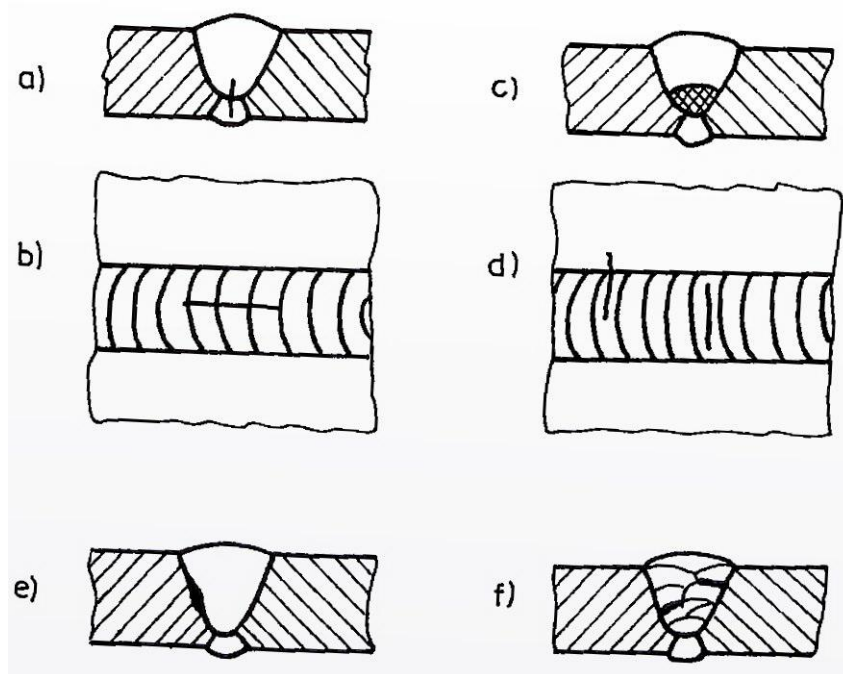
**Trhliny** – ty se mohou vyskytovat jako:

- Horké trhliny – příčinou vzniku je hlavně chemické složení základního materiálu, či vyšší obsah síry. Vznikají mezi 800 a 900 °C.
- Studené trhliny – vznikají působením vodíku. Vznikají po konci svařování při teplotách pod 3000 °C.
- Žíhací trhliny – vznikají buď v nízkoteplotné oblasti (do 300 °C) příčinou velkého teplotního gradientu mezi povrchem a středem svarového spoje či v oblasti dolních žíhacích teplot (500 – 600 °C).
- Lamelární trhliny – mohou se vyskytovat v základním materiálu, nebo v tepelně ovlivněné oblasti hlavně za vysokých teplot, ale k šíření může docházet i za studena. Tvoří se za spolupůsobení napjatosti v místech, kde jsou v pleších rozválcovány nečistoty typu vměstků.
- Kráterové trhliny – jedná se o specifický druh horkých trhlín vzniknuvších při rychlém a náhlém ukončení svařování. Vznikají v dutině kráteru a jsou způsobeny smršťováním při tuhnutí svarového kovu.



Dle tvaru a umístění se dělí na:

- podélné trhliny uvnitř svaru (obr. 33a), či na povrchu svaru (obr. 33b),
- příčné trhliny uvnitř svaru (obr. 33c), či na povrchu svaru (obr. 33d).



a, b) trhliny podélné, c, d) trhliny příčné, e, f) studený spoj.

Obr. 33 Velmi nebezpečné vady svarových spojů. [1]

**Vady povrchu svarů** – jde o nadměrně převýšený svar a prohloubený svar na povrchu.

**Neprůvary** – defekty vznikající neúplným natavením základního materiálu nebo přilehlých svarových housenek. Vznikají především v důsledku vysoké rychlosti svařování, předběhnutím svarové lázně.

#### 6.4 Kontrola svarových spojů [1],[3],[8],[16]

Svarový spoj představuje heterogenní soubor struktur, z nichž vyplývají různé vlastnosti. Proto je vyžadováno více měřených vzorků či více měření. Zařazení vad dle normy je uvedeno v příloze číslo 2. Kontrolu svarů dělíme podle vlivu, který mají na svarový spoj na:

- nedestruktivní – nedochází k porušení,
- destruktivní – dochází k porušení.

##### 6.4.1 Nedestruktivní zkoušky [1],[8],[16]

Jsou rozšířené, jelikož se výrobky po zkoušce dají používat. Vychází z jednoduchého názoru, že pokud nejsou ve svaru vady (či jen malé, nezávažné), bude spoj dobře sloužit. Lze však posoudit pouze část užitných vlastností spoje. Představují důležitou část výroby a provozní spolehlivosti. Význam kontroly spočívá v zajištění kvality, funkčnosti a bezpečnosti.

Nedestruktivní zkoušky pro kontrolu jakosti svarů dělíme dle toho, jaké vady identifikují:

- Ke zjišťování povrchových vad:
  - vizuální,

- penetrační,
- magnetická prášková.
- Ke zjišťování vnitřních vad:
  - prozářením,
  - ultrazvukem.

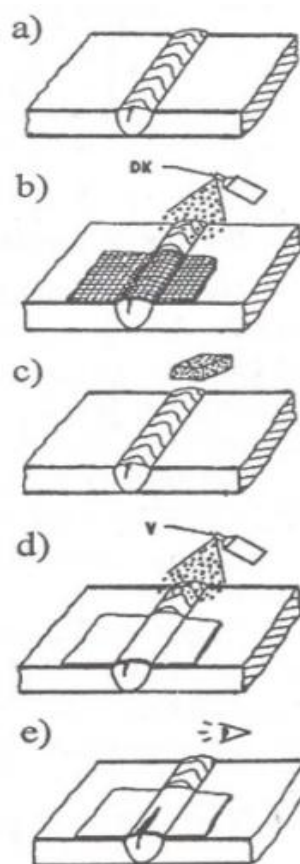
**Vizuální kontrola** je nejjednodušší a nejlevnější kontrola. Prohlídkou prostým zrakem, či s pomocí optických přístrojů zjišťujeme povrchové defekty. Dle přístupnosti dělíme vizuální kontrolu na *přímou* (okem) a *nepřímou* (pomocí optických přístrojů). Kontrola probíhá na očištěném povrchu před dalšími operacemi. Jde o jedinou metodu hodnotící přímo samotné vady, ostatní zkoušky posuzují pouze indikace vad. Kontrola bývá doplněna kontrolou vnějších rozměrů měřením převýšení svaru, nepravidelný povrch, neprovařený kořen, krápníky, zápaly.

**Penetrační – kapilární** zkouška užívá vhodnou detekční kapalinu, výrazného zbarvení. Ta proniká do nečelistvosti v povrchu součástky. Po odstranění kapaliny z povrchu vzorku vzlíná kapalina z nečelistvostí vlivem kapilárních sil do nanesené vývojky. Vady se tak zviditelní. Metoda má časové fáze. Začíná očištěním povrchu (odmaštění, umytí), pokračuje nanesením penetrantu (zkušební kapaliny), jeho působením. Poté se přebytečný penetrant odstraní, povrch se vysuší a vyvolá se indikace nanesením vývojky – vytvořením kontrastního podkladu pro vzlínavou kapalinu, zajišťuje viditelnost. Metoda končí prohlídkou povrchu a vyhodnocením. Dle použitých detekčních prostředků rozeznáváme metody:

- barevné indikace – kontrastní barevná indikace,
- fluorescenční – zkušební kapalina je fluorescenční,
- dvouúčelová – fluorescenční kapalina je i barvivem.

Výhodou je nenáročnost, nízké náklady, snadná indikace vad a citlivost metody. K nevýhodám patří nestálost výsledků (po delší době mohou menší vady zmizet a větší se rozpíjí), obtížnost registrace vad. Kapilární zkoušku lze provádět na všech materiálech (magnetických i nemagnetických).

**Magnetická prášková** zkouška detekuje vady povrchové či těsně podpovrchové. Principem je zviditelnění magnetických siločar vystupujících na povrch feromagnetických materiálů. Je-li u povrchu vada, siločáry ji obcházejí a nad povrchem vytvářejí na něm magnetické póly. Pro indikaci vad se používá feromagnetický prášek rozptýlený v emulzi. V porušených místech je prášek přitahován a vytváří obrys vady. Vzorek magnetizujeme průchodem elektrického proudu – *magnetování proudové*, nebo elektromagnetem – *magnetování pólové*. Směr průchodu proudu je orientován kolmo pro největší účinek.



a) příprava povrchu, b) nanesení penetrantu, c) odstranění přebytku penetrantu, d) vyvolání indikace, e) vyhodnocení.  
Obr. 34 Kapilární zkouška. [8]

Výhodou je cena, jednoduchost, schopnost odhalení podpovrchových vad. Nevýhodami je obtížné zapisování dat, možnost opálení povrchu, obtížnost zjištění malých a oblých vad.

**Zkouška ultrazvuková** funguje na principu šíření akustického vlnění zkušebním vzorkem. Zaznamenávají se změny v šíření vlnění vyvolané změnou prostředí. V homogenním prostředí se šíří přímo, na rozhraní prostředí (vady) se částečně odrazí, nebo jsou pohlceny a zobrazí se na obrazovce. Zde se vyhodnotí rozdíly intenzit a časové posunutí vln. V místě vad se na obrazovce objevuje poruchové echo. Dobře zjistitelné jsou vady plošné, obtížněji vady objemové. Nejjednodušší ultrazvuková metoda je *průchodová*. Vady jsou překážkou, za níž se tvoří ultrazvukový stín (snižují akustický tlak vln). Na povrch se umísťují dvě protilehlé oddělené sondy. Nelze rozlišit, zda pokles akustického tlaku způsobila vada či špatné akustické navázání. Další je metoda *odrazová – impulsová*. Dává informace o vadách, struktuře, rozměrech apod. Sonda vyšle impuls, který se odrazí od všech rozhraní, vrací se a časový průběh je zobrazen. Dává informace o vzdálenosti odrazové plochy dle zpoždění impulsu. Výhodou je užití jediné sondy.

**Zkouška prozářením** (RTG) slouží k detekování vnitřních a nepřístupných vad. Principem je schopnost rentgenového či gama-záření prostupovat tuhými látkami a působit na fotografický materiál. Po prozáření detektorem (radiografický film) se získají důkazy o velikosti, množství, typu a vzájemné poloze vad. Jako zářiče se využívají rentgenové lampy, nebo použijeme-li gama záření, tak malé množství radioaktivního zářiče. Zkouška je citlivá především pro objemové vady, méně citlivá pro plošné vady. Nevýhodami je cena, nutnost zabezpečené pracoviště a školený personál.

#### 6.4.2 Destruktivní zkoušky [1],[8],[16]

Provádí se na zvláštních kusech, zkušebních vzorcích určených pouze ke zkouškám. Vychází se z předpokladu, že pokud zkoušený vzorek vyhoví požadavkům, daná technologie svařování bude vhodná. Musí se však dodržet přesných technologických podmínek, jako u svařování vzorku. Destruktivní zkoušky mechanických vlastností jsou:

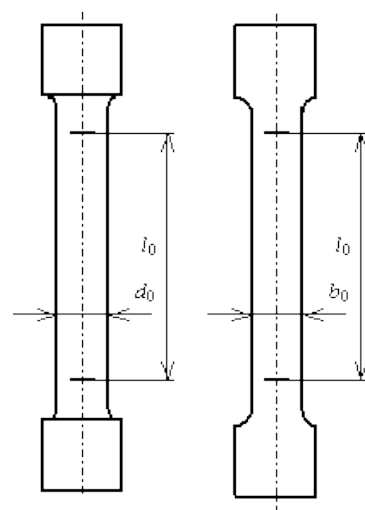
- příčná zkouška tahem,
- zkouška lámavosti,
- zkouška rázem v ohybu,
- zkouška rozlomením,
- zkouška mikro a makro struktury,
- zkouška tvrdosti.

**Zkouška tahem** probíhá na trhačím stroji deformací zkušební tělesa tahovým zatížením, nejčastěji do lomu, pro stanovení mechanických vlastností dle ČSN EN ISO 6892-1. Zkušební tyč je odebrána napříč svarovým spojem, její rozměry jsou normalizovány, tyč je zobrazena na obr. 35. Na tyči je vyznačena měřená délka  $l_0$ .

Tahovou zkouškou zjišťujeme mechanické vlastnosti:

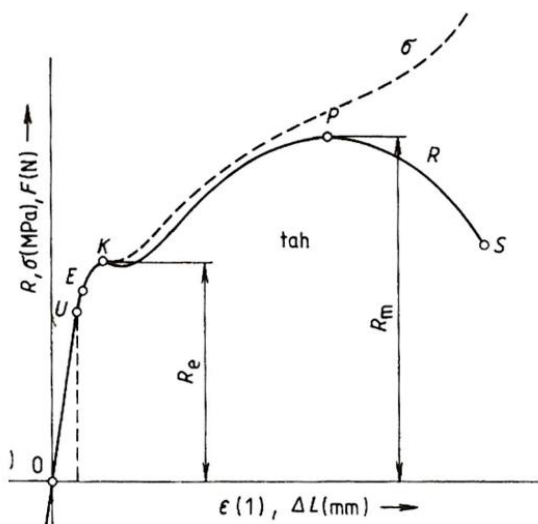
- mez kluzu  $R_e$  [MPa],
- mez pevnosti  $R_m$  [MPa],
- poměrné prodloužení  $\varepsilon$  [%],
- tažnost  $A$  [%],
- kontrakci (zúžení)  $Z$  [%].

Z tahové zkoušky získáme mez pevnosti v tahu a mez kluzu v grafickém záznamu zkoušky, pracovním diagramu (obr. 36).



Obr. 35 Zkušební tyče. [3]





Obr. 36 Tahový diagram. [3]

Některé typy materiálů nemají výraznou mez kluzu, pro ně se zavádí smluvní mez kluzu  $R_p$  0,2. Jedná se o napětí zkušební tyče vyvolávající trvalé prodloužení 0,2 % z celkového poměrného prodloužení.

Mez kluzu:

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad (6.1)$$

Kde:  $F_e$  [MPa] - síla na mezi kluzu,  
 $S_0$  [mm<sup>2</sup>] - počáteční průřez zkušební tělesa.

Mez pevnosti v tahu:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (6.2)$$

Kde:  $F_m$  [N] - maximální síla.

Poměrné prodloužení:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (6.3)$$

Kde:  $\Delta l$  [mm] - celkové prodloužení,  
 $l_0$  [mm] - počáteční délka.

Tažnost:

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad (6.4)$$

Kde:  $L_0$  [mm] - počáteční měřená délka,  
 $L_u$  [mm] - měřená délka po lomu.

Kontrakce:

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 \quad (6.5)$$

Kde:  $S_0$  [mm<sup>2</sup>] - počáteční průřez zkušební tělesa,  
 $S_u$  [mm<sup>2</sup>] - průřez zkušební tělesa po lomu.

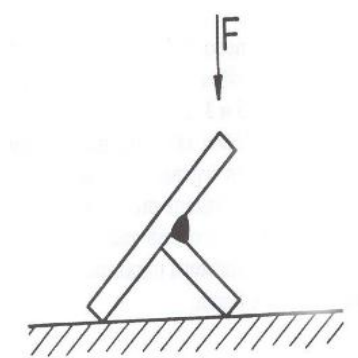
**Zkouška lámavosti**, její podstatou je ohybová deformace. Zkoušejí se čtyři zkušební tělesa. Dvě se zatěžují ze strany kořene a dvě ze strany líce svaru. K ohýbání se používá ohýbací-

ho trnu nebo vnitřních válečků. Jejich průměr se rovná čtyřnásobku tloušťky zkušební tyče. Dosažení úhlu ohybu je 120°. Při zkoušení nesmí kus vykazovat samostatné vady 3 mm v jakémkoli směru.

**Zkouška rázem v ohybu** spočívá v přeražení zkušební tyče jediným rázem kyvadlového kladiva (Charpyho). Zkušební tyč má uprostřed vyhotoven vrub a je podepřena na obou koncích. Má čtvercový průřez, a jeden ze dvou typů vrubů - V, nebo U vrub. Kladivo otočné kolem své osy se zdvihne, do jeho nejnižší polohy se umístí vzorek. Kladivo se spustí, přerazí zkušební tyč a vychýlí se do konečné polohy. Při přeražení se spotřebuje nárazová práce stanovující odolnost materiálu. Nárazová práce se stanovuje v Joulech a je měřítkem odolnosti materiálu proti nárazovému namáhání.



Obr. 37 Zkouška vrubové houževnatosti. [8]



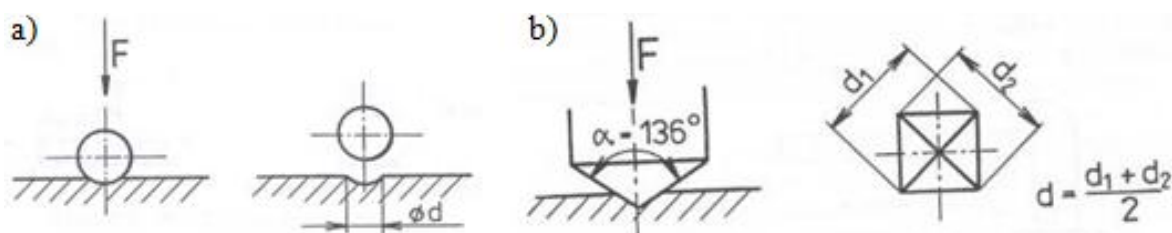
Obr. 38 Zkouška rozlomením. [8]

**Zkouška rozlomením** spočívá v rozlomení spoje ve svařovém kovu tak, aby šlo pozorovat lomovou plochu. Zkouška se provádí statickým či dynamickým ohybem nebo krutem. Inicie lomu může být ovlivněna tvarem vrubu a teplotou. Kontrola je podroben celý svarový spoj, ale zkušební kus je rozdělen na více zkušebních těles. Zkušební tělesa jsou opatřena vrubem k docílení vzniku lomu ve svařovém kovu. Jedná se o nejjednodušší zkoušku pro zjišťování typů, rozměrů a rozmístění vnitřních vad. Jedná se např. o dutiny, trhliny, studené spoje, neprůvary a pevné vměstky na ploše lomu. Princip zkoušky je znázorněn na obr. 38 Zkouška rozlomením.

**Zkouška makroskopické struktury** se používá pro stanovení charakteru spoje, nejčastěji prohlídkou příčného řezu zkušební vzorku. Kontrola je prováděna na vzorcích orientovaných příčně k ose svaru, které zahrnují tepelně ovlivněnou oblast i svarový kov. Řezné plochy vzorku se obrousí, naleptají, osvětlí a studují. Vyhodnocuje se stupeň jakosti.

**Mikroskopická kontrola** se od makroskopické liší tím, že prohlídka vzorku je prováděna pod mikroskopem (50 – 500 násobné zvětšení). Pozorují se zrna materiálu, jejich hranice, strukturní složky svaru a tepelně ovlivněné oblasti.

**Zkouška tvrdosti** je prováděna pro stanovení nejnižších a nejvyšších hodnot tvrdosti svařového kovu a tepelně ovlivněné oblasti. Základní zkoušky tvrdosti se provádějí dle *Brinella* (HB), do zkoušeného materiálu je vtlačována ocelová kulička silou  $F$ , po odlehčení je měřen průměr vtisku. Dále dle *Vickerse* (HV) vtlačováním čtyřbokého jehlanu s vrcholovým úhlem 136° silou  $F$ . Po odlehčení se měří úhlopříčky. A dle *Rockwella* (HRC), identorem je diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120°. Metody jsou zobrazeny na obr. 39.



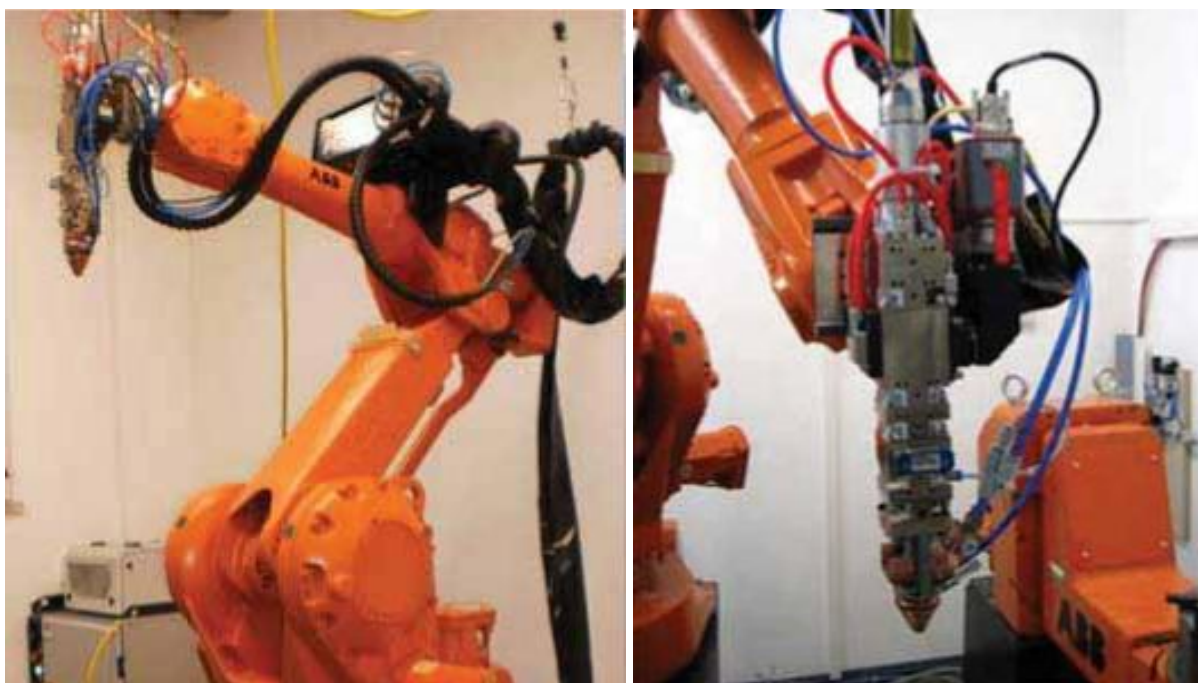
Brinell HB, b) Vickers HV,  
Obr. 39 Zkoušky tvrdosti. [8]

## 7 PRŮBĚH EXPERIMENTU

V této kapitole bude podrobně popsán postup výroby svarů a jejich následné studování. Budou zde uvedeny konkrétní hodnoty a provedeno vyhodnocení svarů, vhodnosti jednotlivých vstupních parametrů pro tvorbu svaru.

### 7.1 Svařování hliníku

Pro svařování hliníku třídy 5000 byl zvolen optický vláknový laser YLS-2000 vyvinutý firmou IPG, se svařovací hlavou. Je zobrazen na obr. 40. Jedná se o 3D obráběcí robot s možností výměny svařovací hlavy za hlavu řezací. Pohyby v osách x, y, z i otáčení kolem os vykonává pohyblivé rameno robotu. Materiály určené ke svaření se upevňují pomocí jednoduchých přípravků či za pomoci upínek na speciálně vytvořený otočný stůl. Během celého procesu je do místa svaru přiváděn ochranný plyn – argon, pro cílené ovlivnění svařovacího procesu. Argon zajišťuje ochrannou atmosféru, je těžší než vzduch proto klesá směrem ke svařenci a chrání lázeň. Laser je umístěn v uzavřené odsávané kabině.



a) Průmyslový robot, b) svařovací hlava,  
Obr. 40 Vláknový laser YLS 2000.

#### Technické parametry stroje

YLS 2000

Jmenovitý výkon [W]: 2000

Možnost rozšíření výkonu [W]: 4000

Vlnová délka [nm]: 1070-1080

Rozměry stroje délka x šířka x výška [mm]: 1106 x 856 x 806

Dosah robota [m]: 1,6

Nosnost polohovadla [kg]: 250

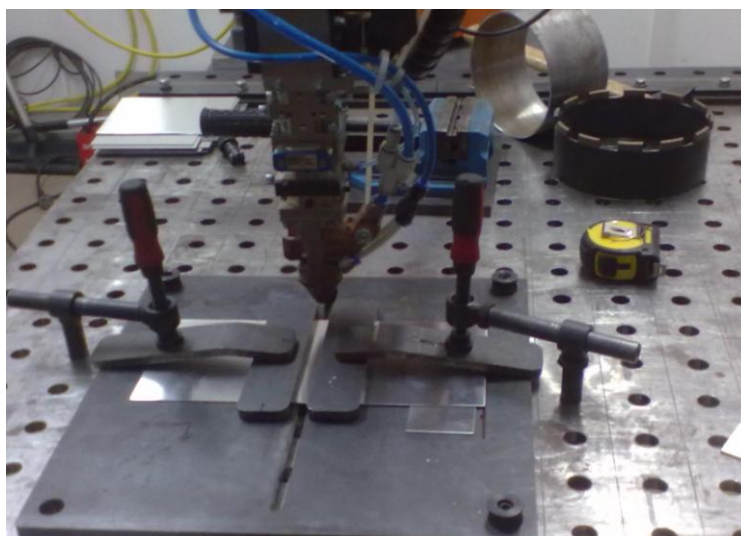
Procesní rychlost [m/min]: do 10

Před samotným svařováním je nutno nastavit vstupní parametry pro svařování. Vstupní parametry experimentu svařování hliníku třídy 5000 je uvedeno v tabulce 3. V procesu byl měněn vstupní výkon, rychlost a vzdálenost ohniska.

Tab. 3 Vstupní svařovací parametry

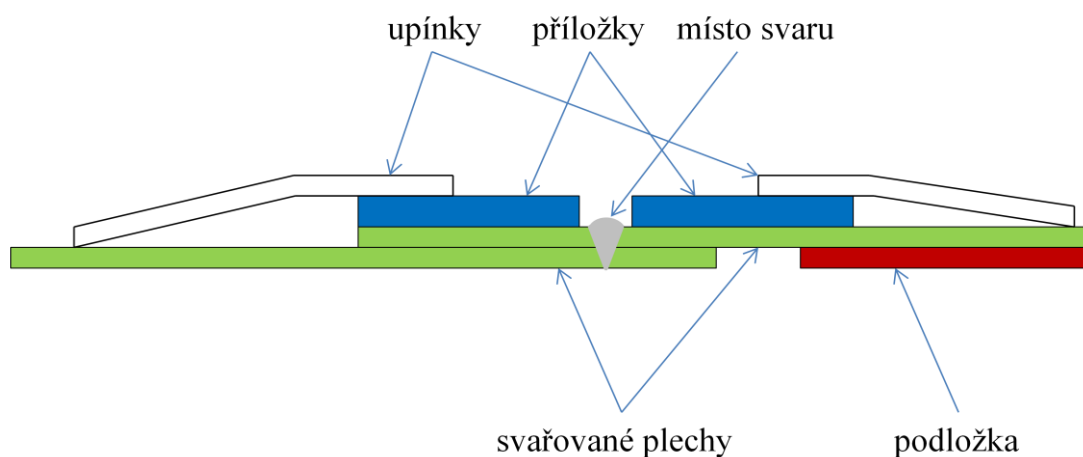
Vzorek	Výkon [W]	Rychlost [mm/s]	Poloha ohniska	Průtok argonu
1	1600	40	F22	18,5
2	1800	40	F22	18,5
3	1600	40	F24	18,5
4	1600	40	F26	18,5
5	1700	40	F26	18,5
6	1600	40	F21	18,5
7	1600	40	F20	18,5
8	1700	40	F20	18,5
9	1600	40	F21,5	18,5
10	1700	40	F21,5	18,5
11	1600	30	F21,5	18,5

Příprava vlastního průběhu svařování vzorků neznázorněn na obr. 41. Na otočném stole je ustaven přípravek na svařování. Pomocí upínek jsou přidrženy plechy určené ke svaření laserem.



Obr. 41 Svařování vzorků laserem.

Pohled na svařovací prostor v průběhu experimentu je uveden v nárysu na obrázku 42.



Obr. 42 Uchycení plechů v průběhu svařování.



## 7.2 Makroskopická zkouška

Po svaření jedenácti vzorků se na ručním pracovišti vystříhali vzorky svarů pro zkoušku makro struktury. Tyto vzorky byly následně připraveny k zalisování po třech. Vzorky byly lisovány při 180 °, za stálého tlaku 250 barů po dobu tří a půl minuty. Pro zalisování se používá pryskyřice multifast. Na zadní stranu vzorků byla vyryta čísla, aby nedošlo k jejich záměně. Po zatavení osmi vzorků, se vzorky vybrousili. Použité stroje na lisování a broušení jsou zobrazeny na obr. 43.



a) Lisovací stroj, b) Brousicí stroj,  
Obr. 43 Stroje pro práci se vzorky.

Zatavené a obroušené vzorky (obr. 44), se připravily na mikroskopickou zkoušku naleptáním kellers etch namíchaným z 5 ml kyseliny dusičné, 3 ml kyseliny chlorovodíkové a 2 ml kyseliny fluorovodíkové.



Obr. 44 Zatavené vzorky.

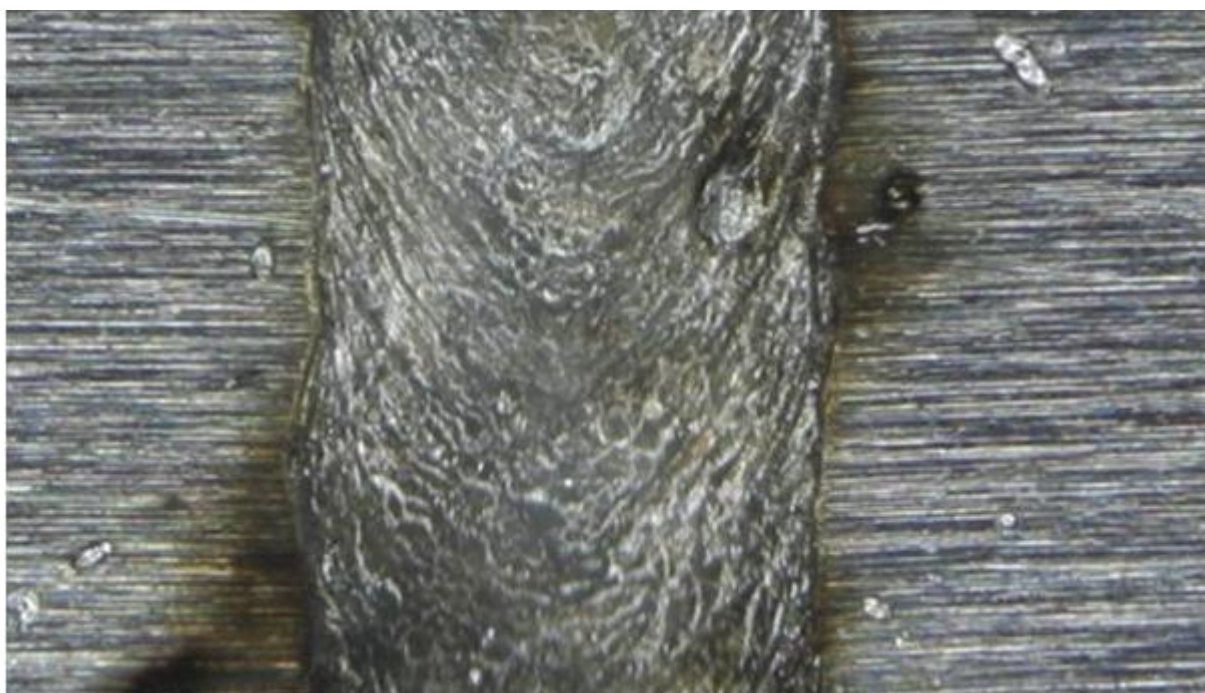
Makrostruktura vzorku svaru číslo jedna je na obrázku 45. V místě styku plechů vznikla bublina.



Obr. 45 Makrostruktura vzorku 1.



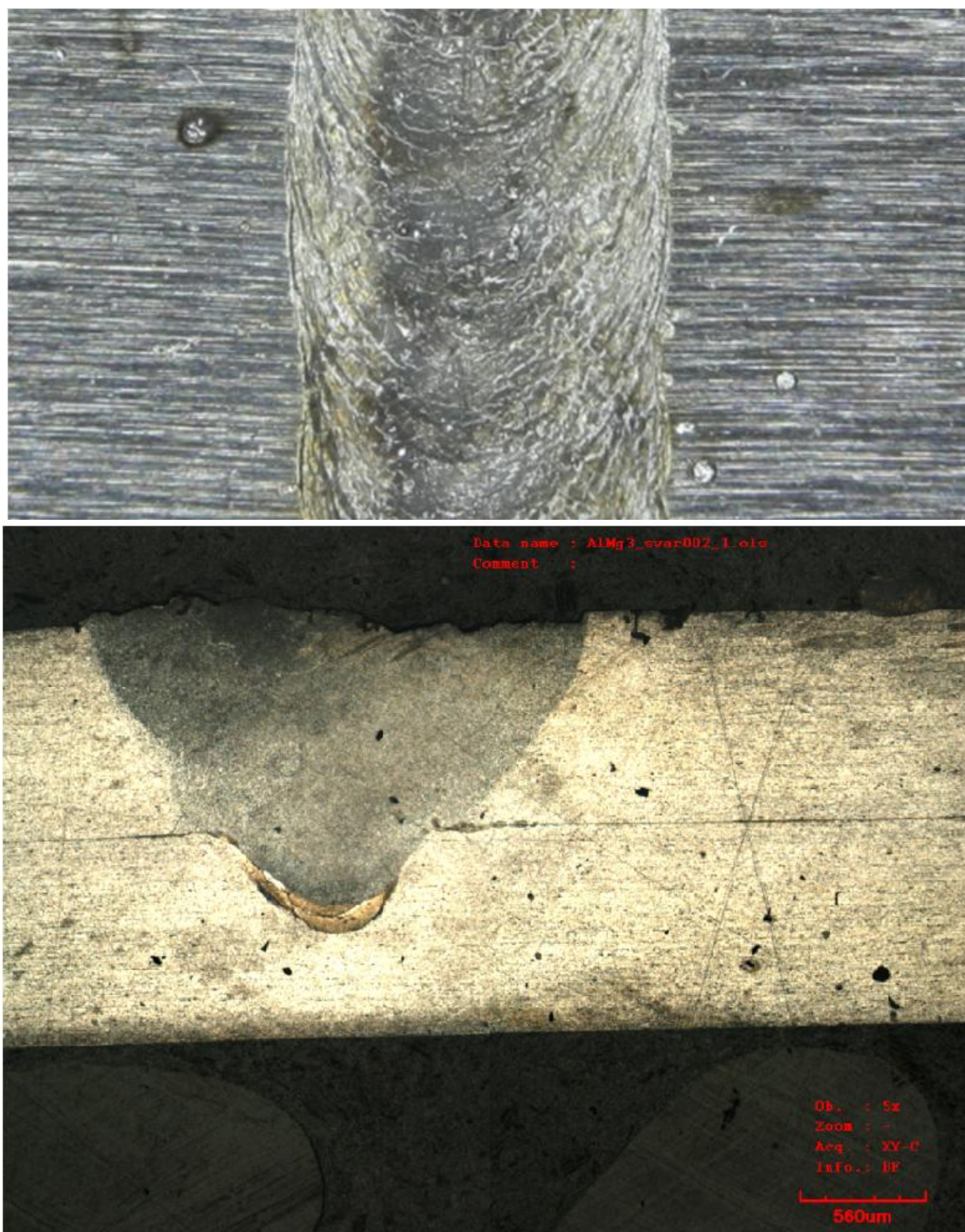
Na obrázku číslo 46 je makrostruktura vzorku dva. Zde došlo k propadnutí svaru.



Obr. 46 Makrostruktura vzorku 2.



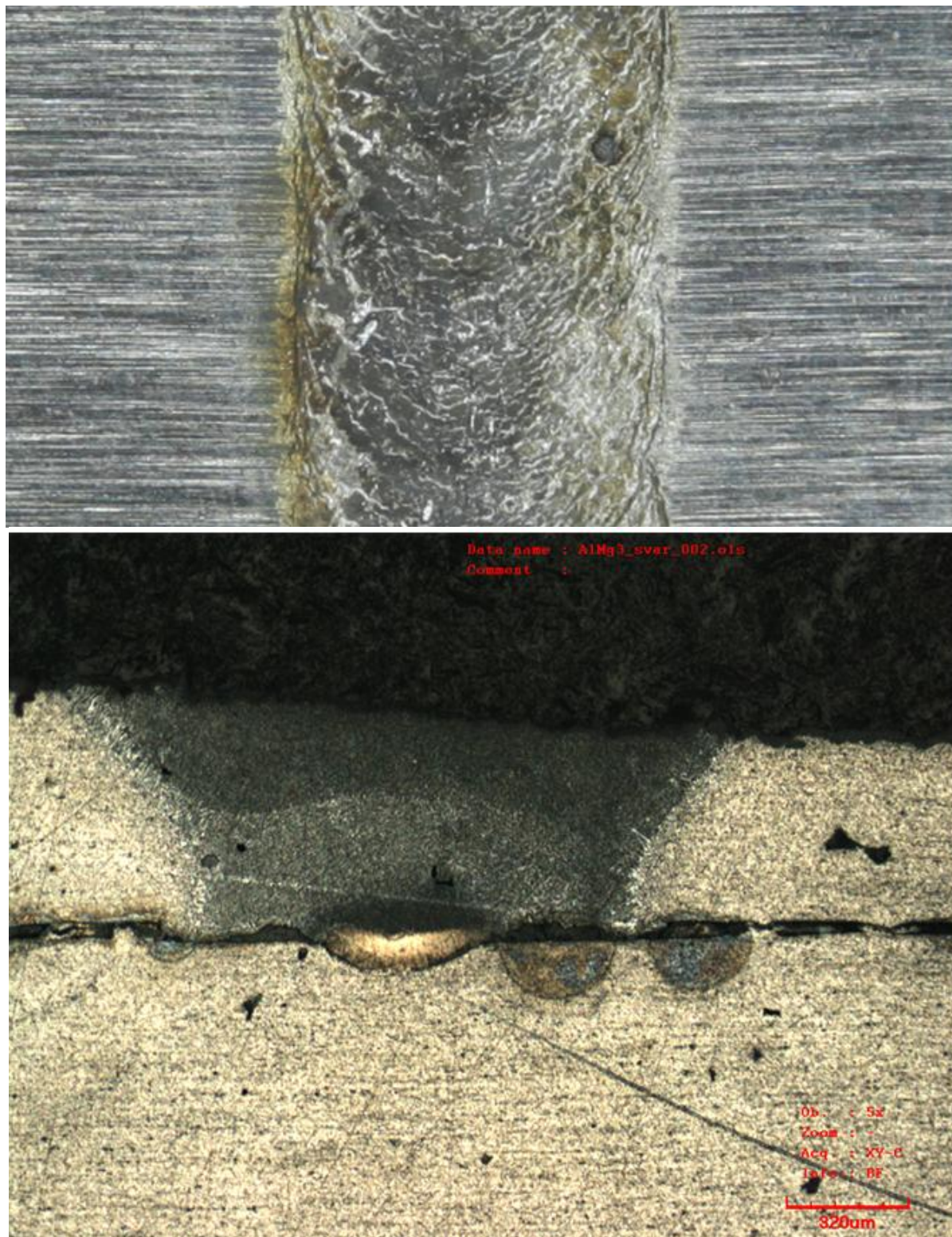
Makrostruktura svařeného vzorku tři je na obrázku 47.



Obr. 47 Makrostruktura vzorku 3.



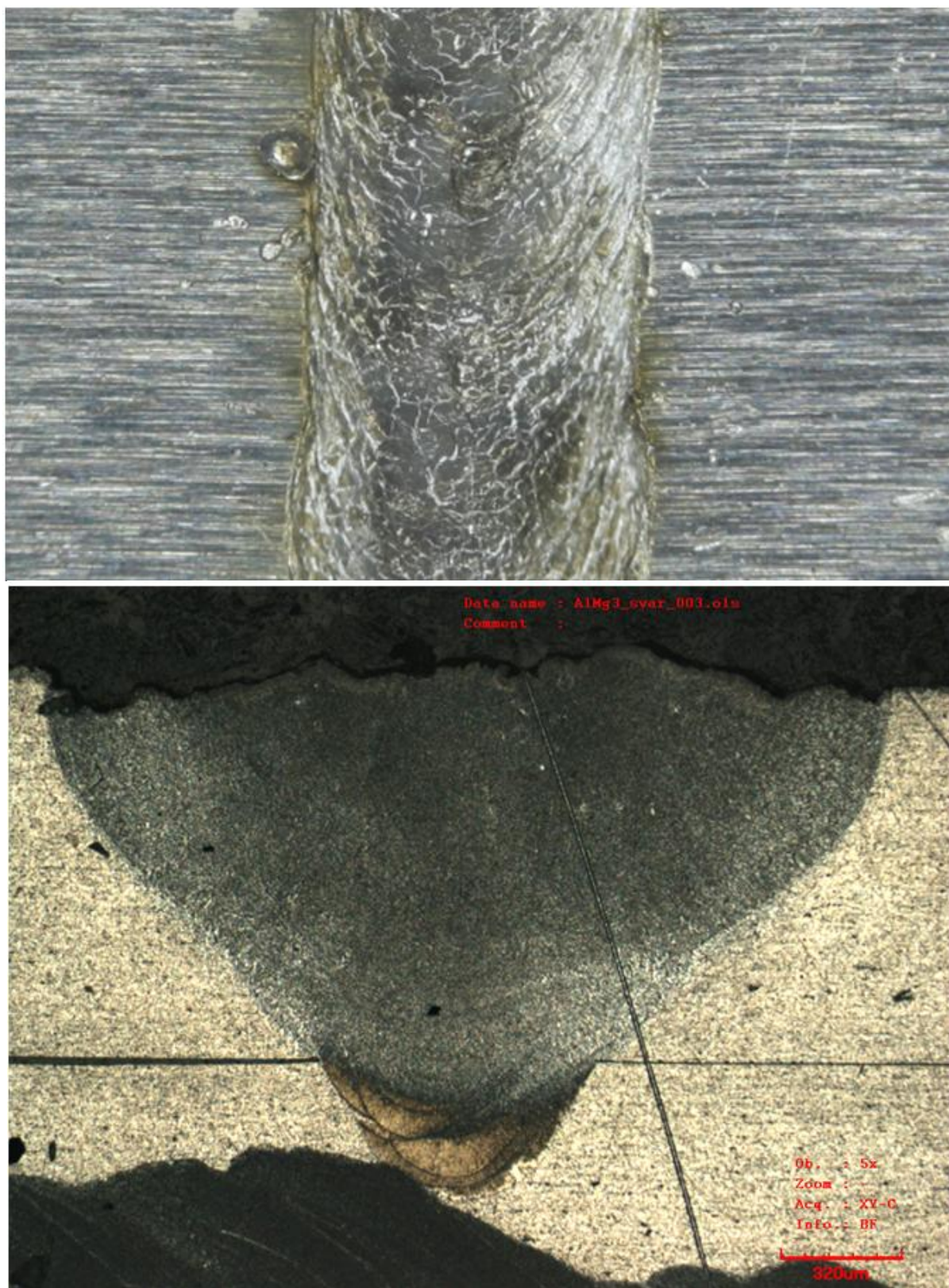
Na obrázku 48 je makrostruktura vzorku čtyři, zde nastalo nedostatečné provaření plechů a nevznikl žádný kořen svaru.



Obr. 48 Makrostruktura vzorku 4.



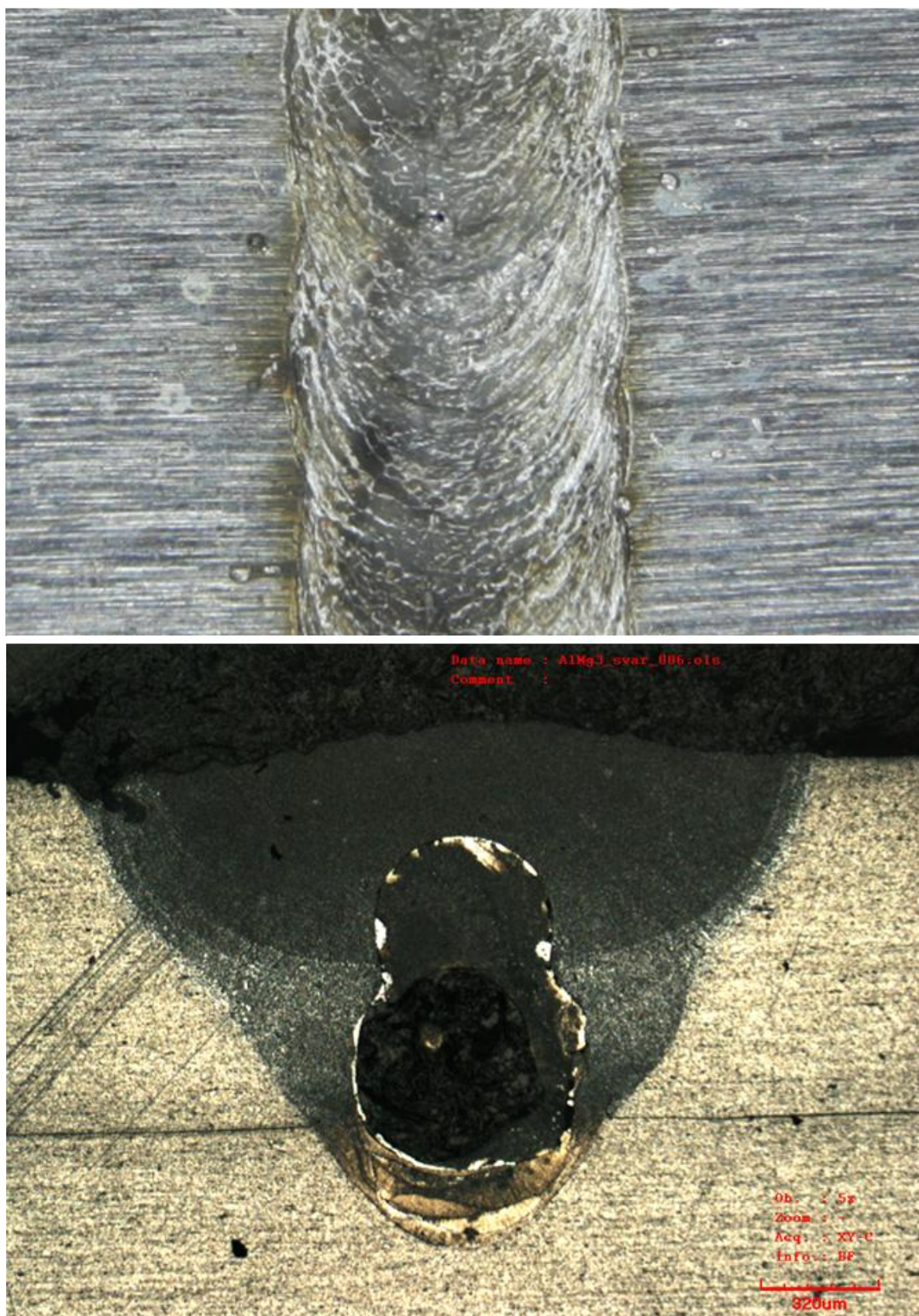
Výsledná makrostruktura vzorku svaru pět je na obrázku 49.



Obr. 49 Makrostruktura vzorku 5.



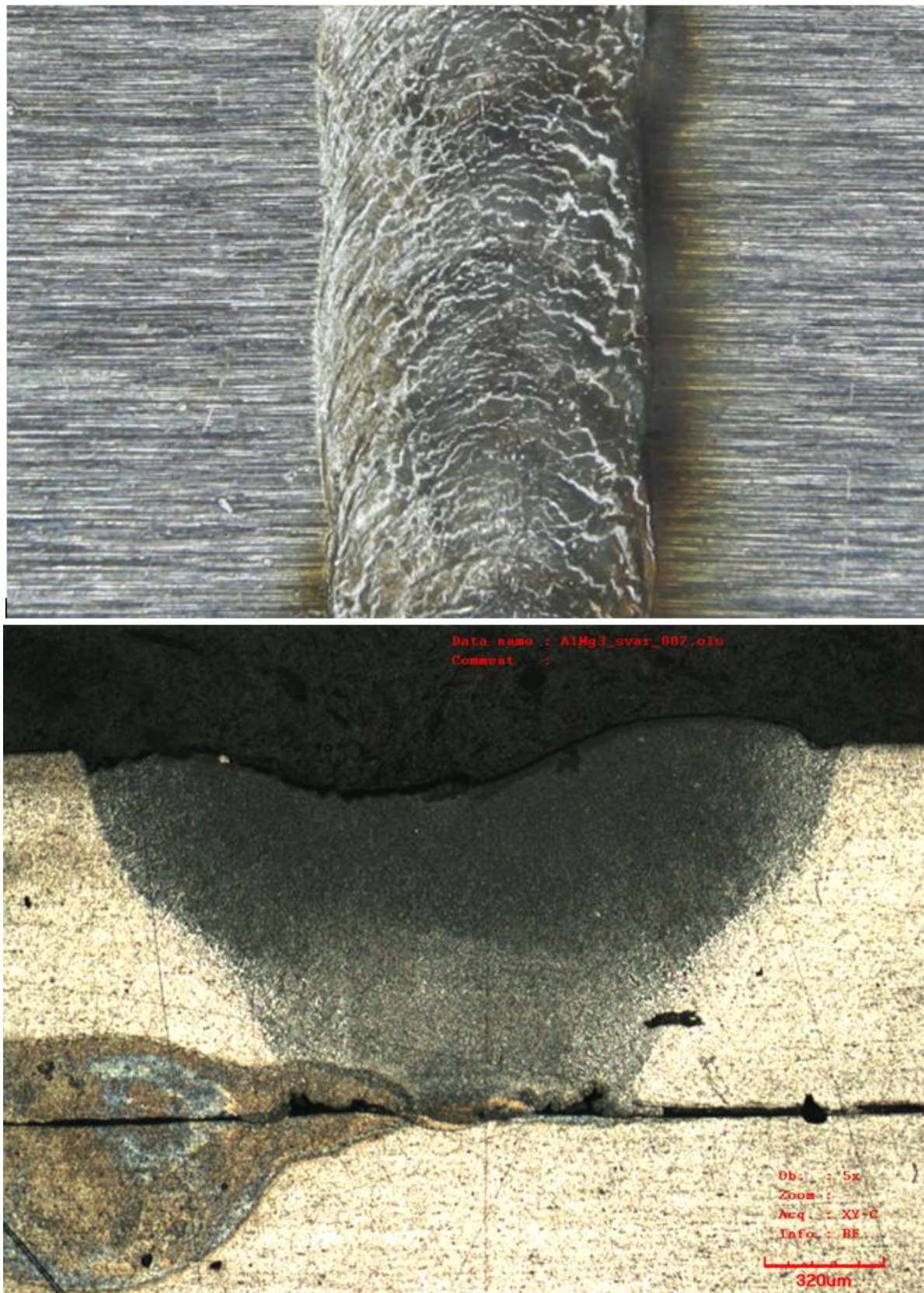
Na obrázku 50 je vidět makrostruktura svaru vzorku šest s bublinou vzniklou ve svaru.



Obr. 50 Makrostruktura vzorku 6.



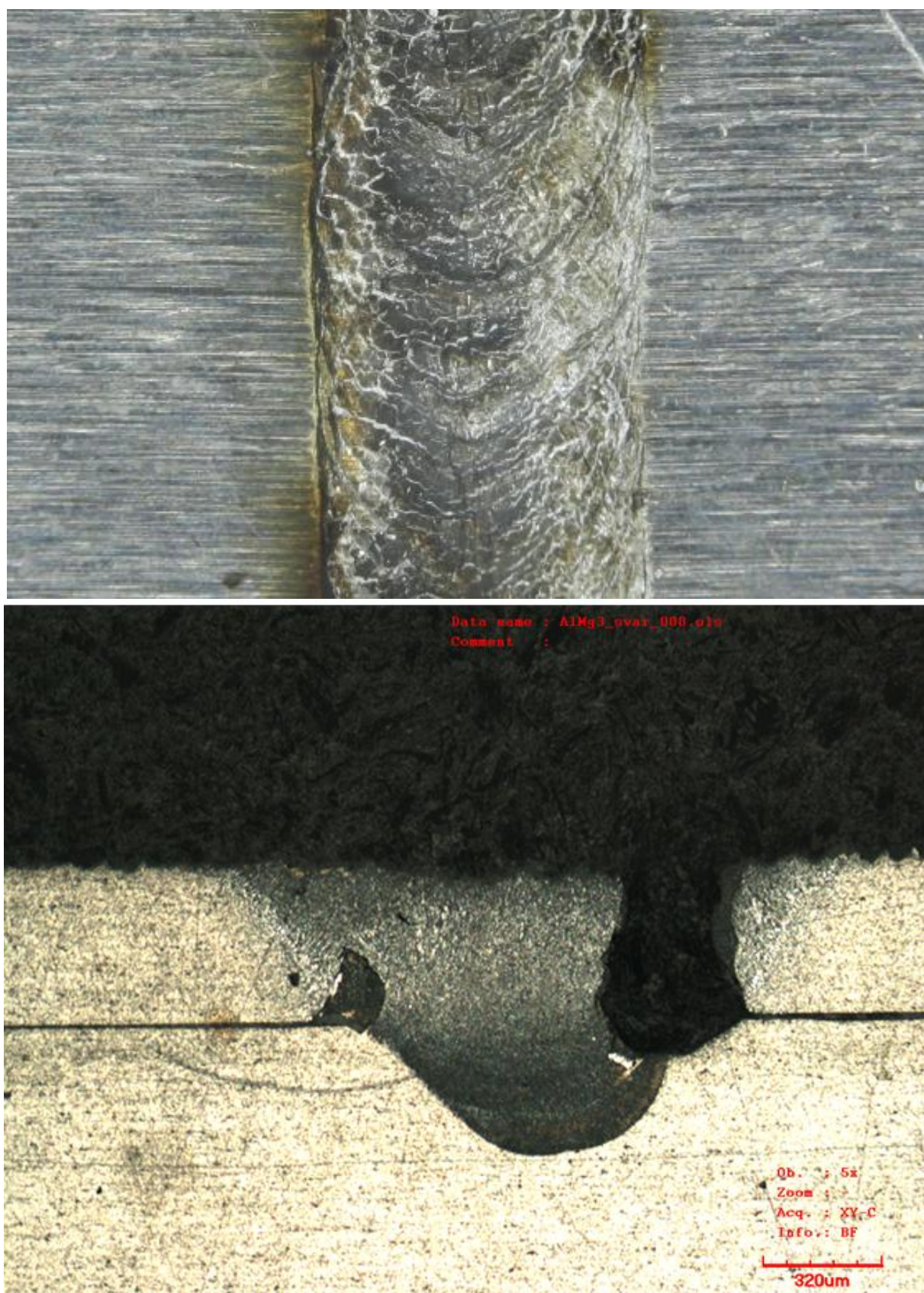
U vzorku číslo sedm na obrázku 51, nedošlo k dostatečnému provaření, to můžeme připisovat nízkému svařovacímu výkonu.



Obr. 51 Makrostruktura vzorku 7.

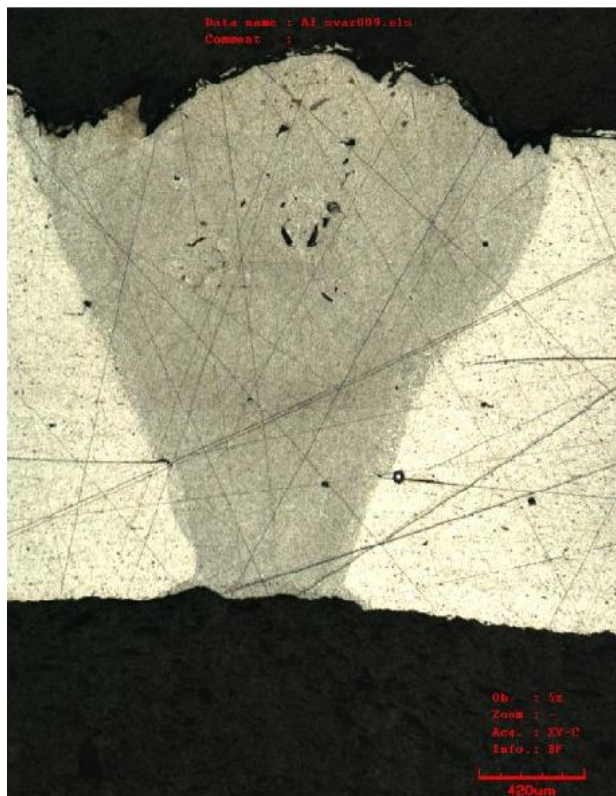


Makrostruktura vzorku svaru osm je na obrázku 52.

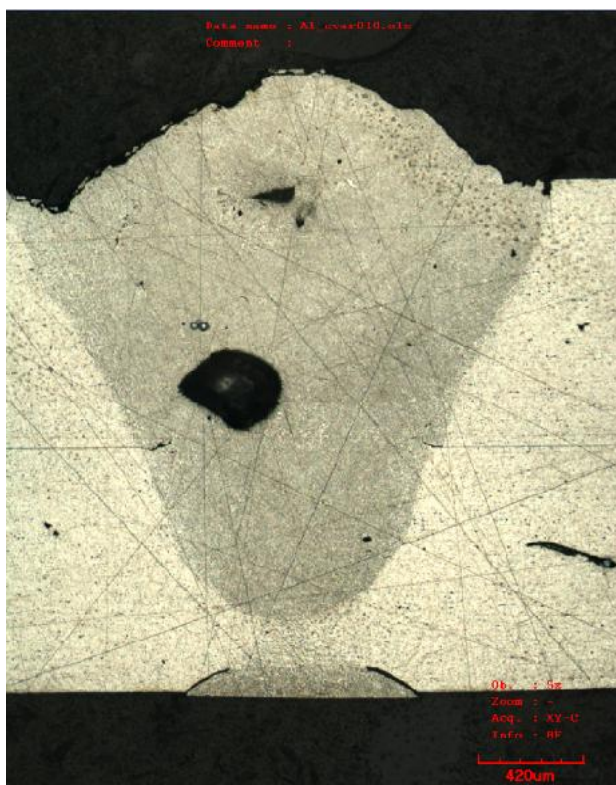


Obr. 52 Makrostruktura vzorku 8.

Makrostruktury dodatečně svařených vzorků po kontrole prvních osmi kusů jsou zobrazeny na obrázcích 53, 54 a 55. U těchto vzorků již nejsou zobrazeny fotky jejich svarových housenek.

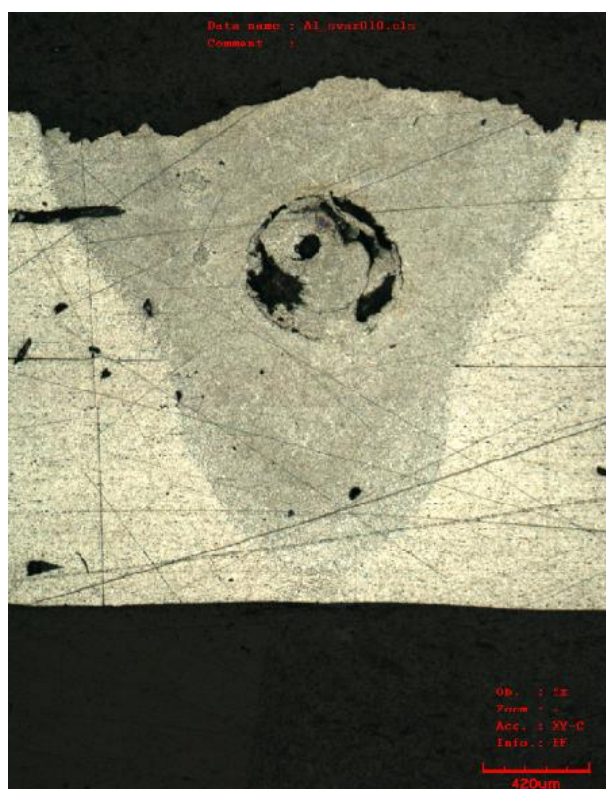


Obr. 53 Makrostruktura vzorku 9.



Obr. 54 Makrostruktura vzorku 10.





Obr. 55 Makrostruktura vzorku 11.

U všech vzorků svarových spojů byla změřena šířka svaru a hloubka průvaru. Hodnoty těchto měření jsou uvedeny v tabulce číslo 4.

Tab. 4 Vyhodnocení svarů

Vzorek	šířka svaru [ $\mu\text{m}$ ]	hloubka průvaru [mm]	poznámka
1	875	1	bublina ve svaru vzorku
2	1400	1	propad svaru
3	962	0,4582	
4	430	0,0744	
5	700	0,3423	nedostatečný průvar
6	750	0,3349	bublina ve svaru vzorku
7	350	0,0372	nedostatečný průvar
8	670	0,3572	bublina ve svaru vzorku
9	868	1	
10	1120	1	
11	1134	0,862	

Z hodnot uvedených v tabulce 4 vyplývá, že v závislosti na šířce svaru a hloubce průvaru bylo nejlepších výsledků dosaženo na vzorku číslo 2, který vykazuje propad svaru. Další vzorky, jejichž vstupních parametrů pro svařování by se mohlo použít při svařování absorbérů, jsou 10 a 11. Tyto vzorky se svařovali s upravenými vstupními parametry po provedení tahových zkoušek na prvních osmi vzorcích. U těchto vzorků došlo k plnému průvaru plechů. Oproti vzorku 2 u nich nedošlo k propadu svaru, tyto vzorky byly svařovány s nižším výkonem a vyšší vzdáleností ohniska.



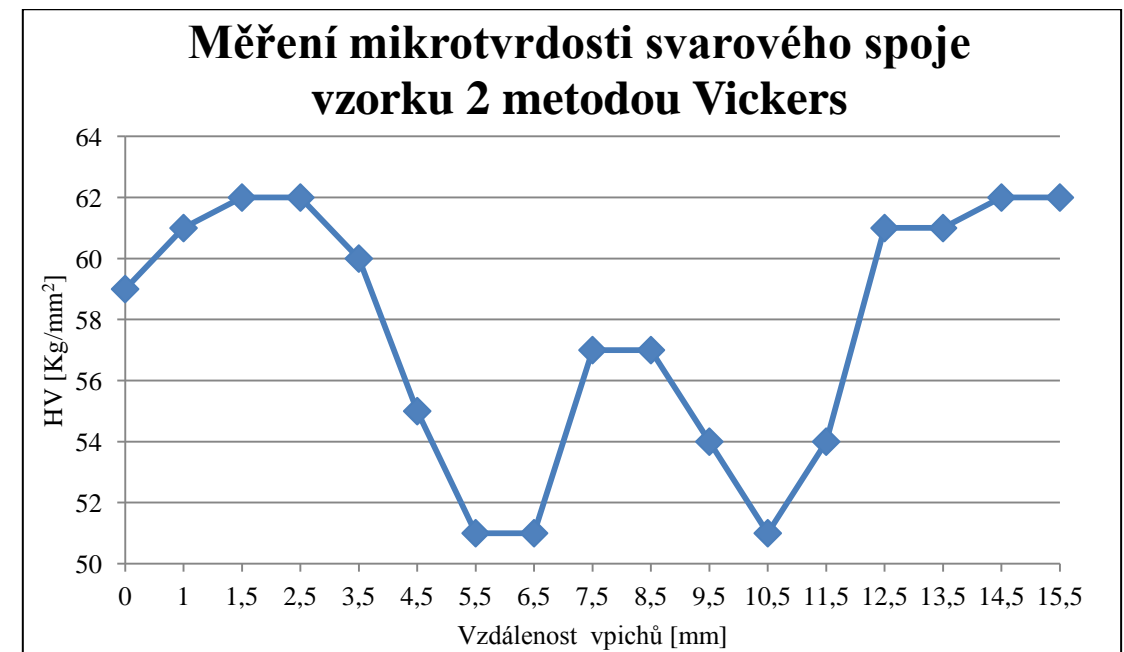
## 7.2 Zkouška tvrdosti

Na zataveném vzorku číslo dva byla provedena zkouška tvrdosti dle Vickerse. Nastavené zatížení při zkoušce bylo jeden kilogram. Výstupní hodnoty zkoušky jsou zobrazeny v tabulce číslo 5.

Tab. 5 Hodnoty zkoušky tvrdosti.

Vpichy	HV1	Vzdálenost [mm]
1	59	0
2	61	1
3	62	1,5
4	62	2,5
5	60	3,5
6	55	4,5
7	51	5,5
8	51	6,5
9	57	7,5
10	57	8,5
11	54	9,5
12	51	10,5
13	54	11,5
14	61	12,5
15	61	13,5
16	62	14,5
17	62	15,5

Vyhodnocení dat zkoušky je zobrazeno grafickou závislostí na obrázku číslo 56.

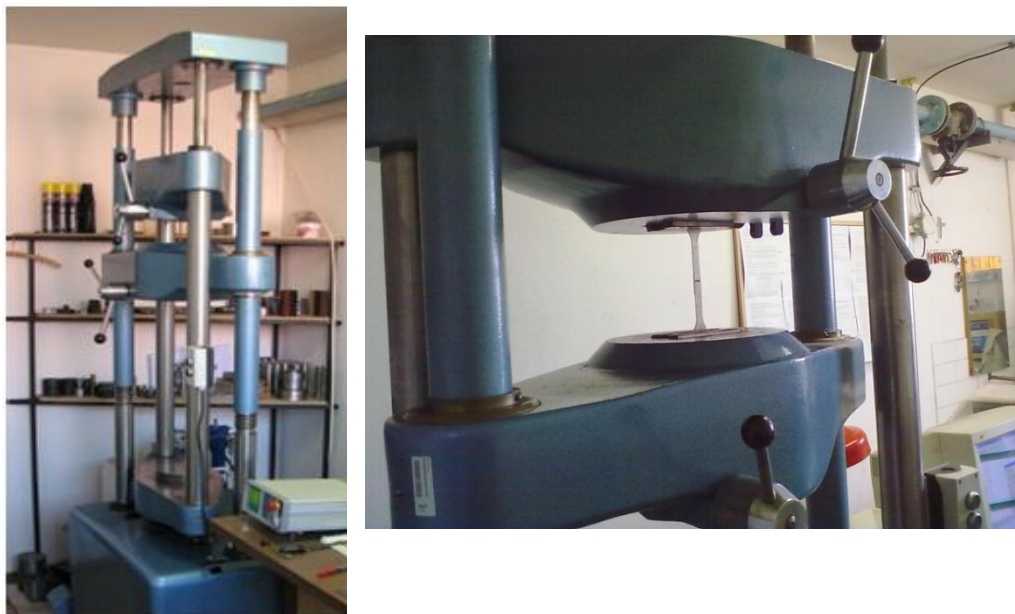


Obr. 56 Grafická závislost zkoušky tvrdosti.

Z obrázku vyplívá, že tvrdost výsledného svaru je nejvyšší v neovlivněném - základním materiálu a nižší v oblasti svarové housenky. Nejnížší naměřená tvrdost ve vzorku je v tepelně ovlivněné oblasti svaru.

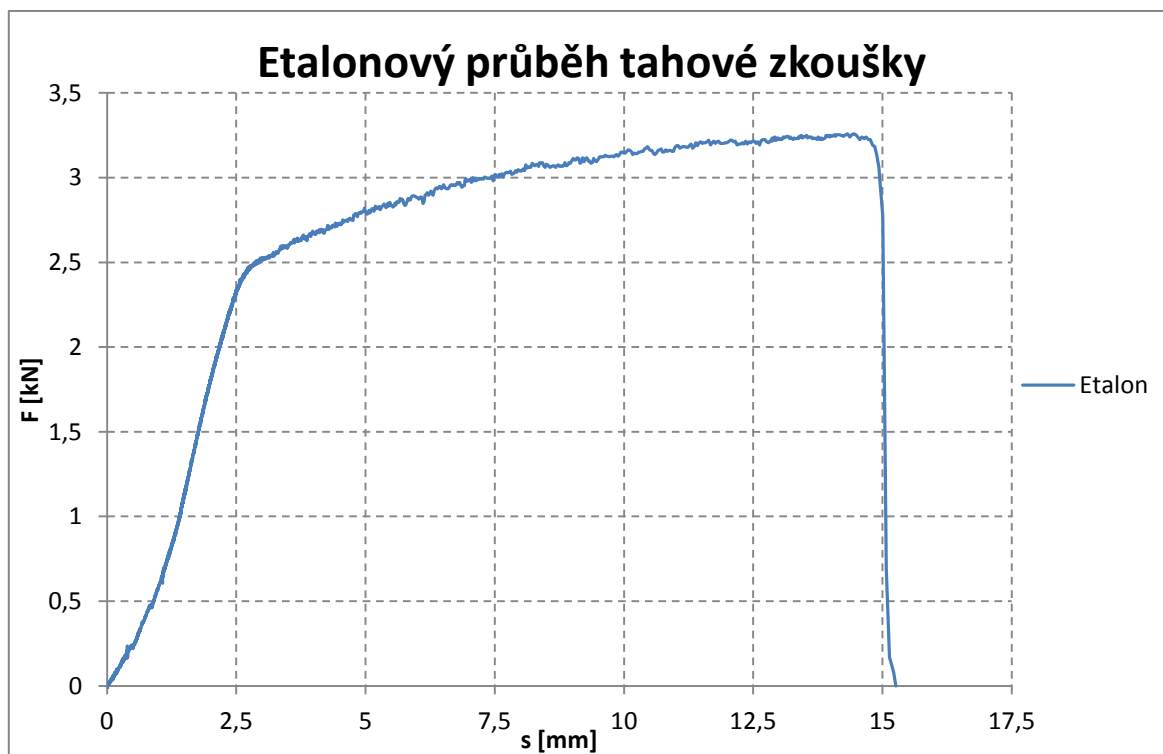
### 7.3 Tahová zkouška

Pro uskutečnění tahové zkoušky se z každého svaru zhotovily tři vzorky. Tyto vzorky byly testovány na hydraulickém zkušebním stroji (obrázek 57). Parametry stroje jsou uvedeny v příloze číslo 3.



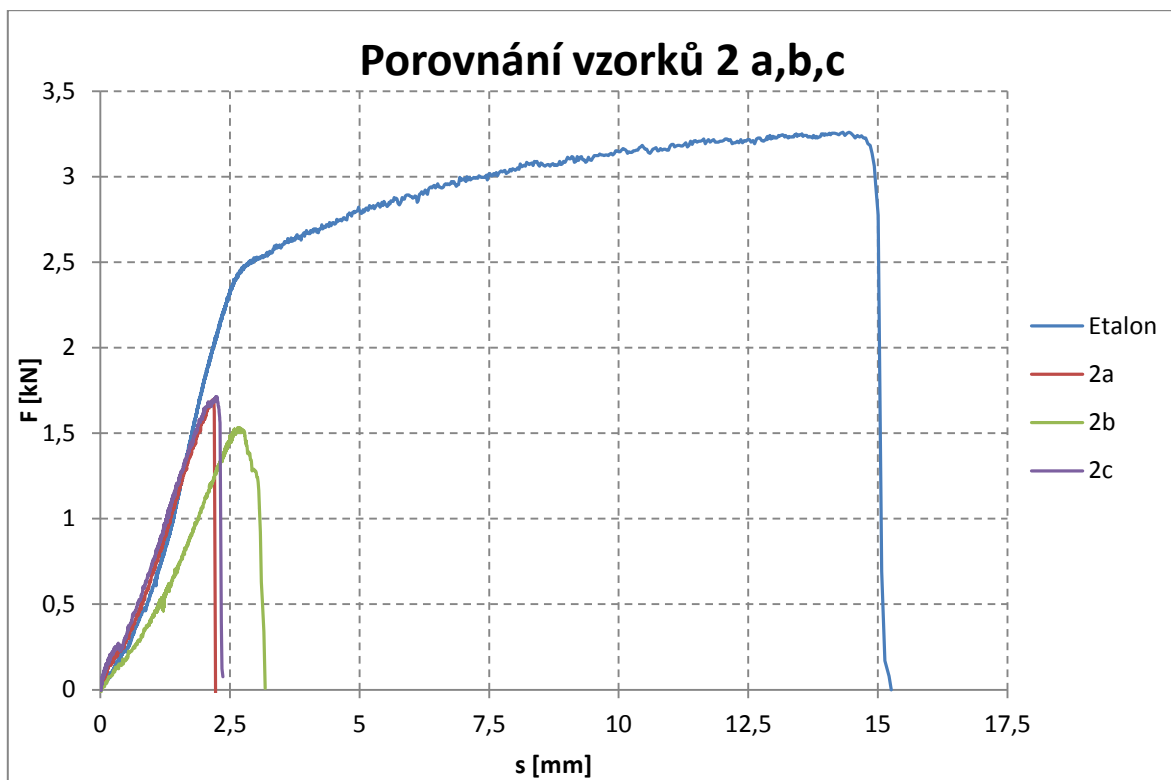
Obr. 57 Hydraulický zkušební stroj ZD40/400kN/.

Ze tří zkušebních vzorků bez svaru se u jednoho vyskytovala trhлина. Díky tomu bylo měření znehodnoceno. Zbylé dva průběhy vzorků byly zprůměrovány a vznikl tak „etalonový“ průběh tahové zkoušky. Ten je znázorněn na obrázku 58.

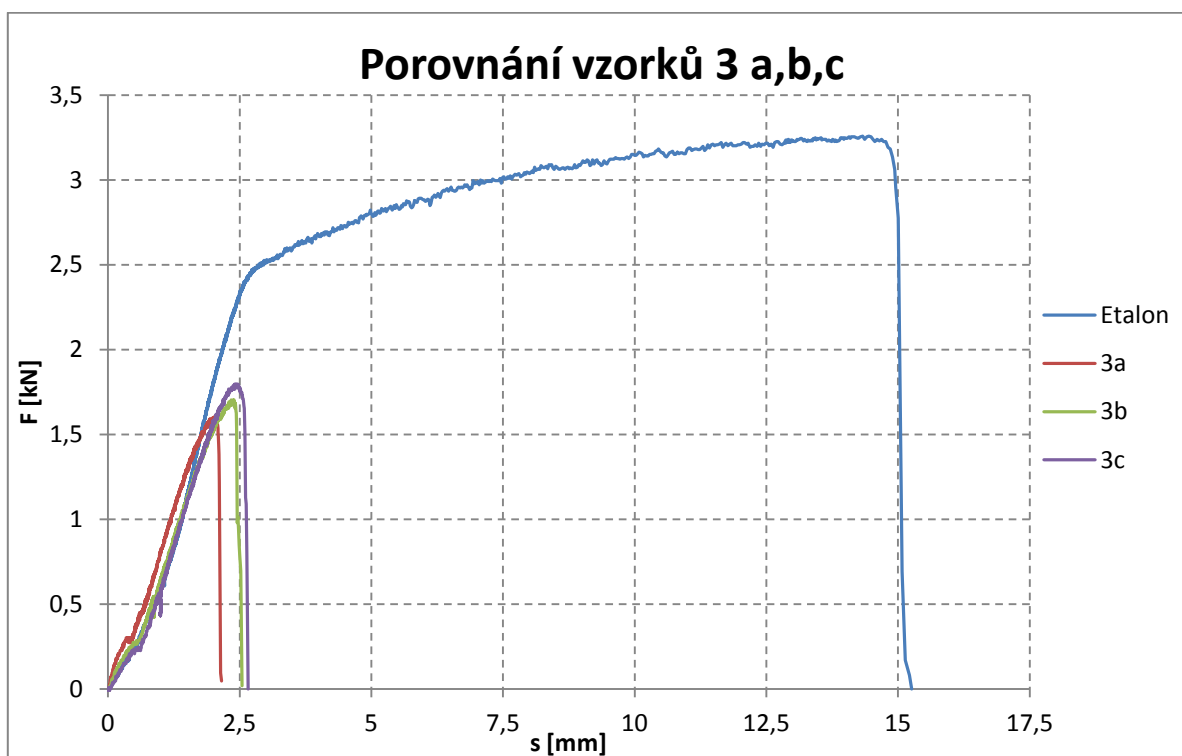


Obr. 58 Průběh tahové zkoušky vzorků bez svaru

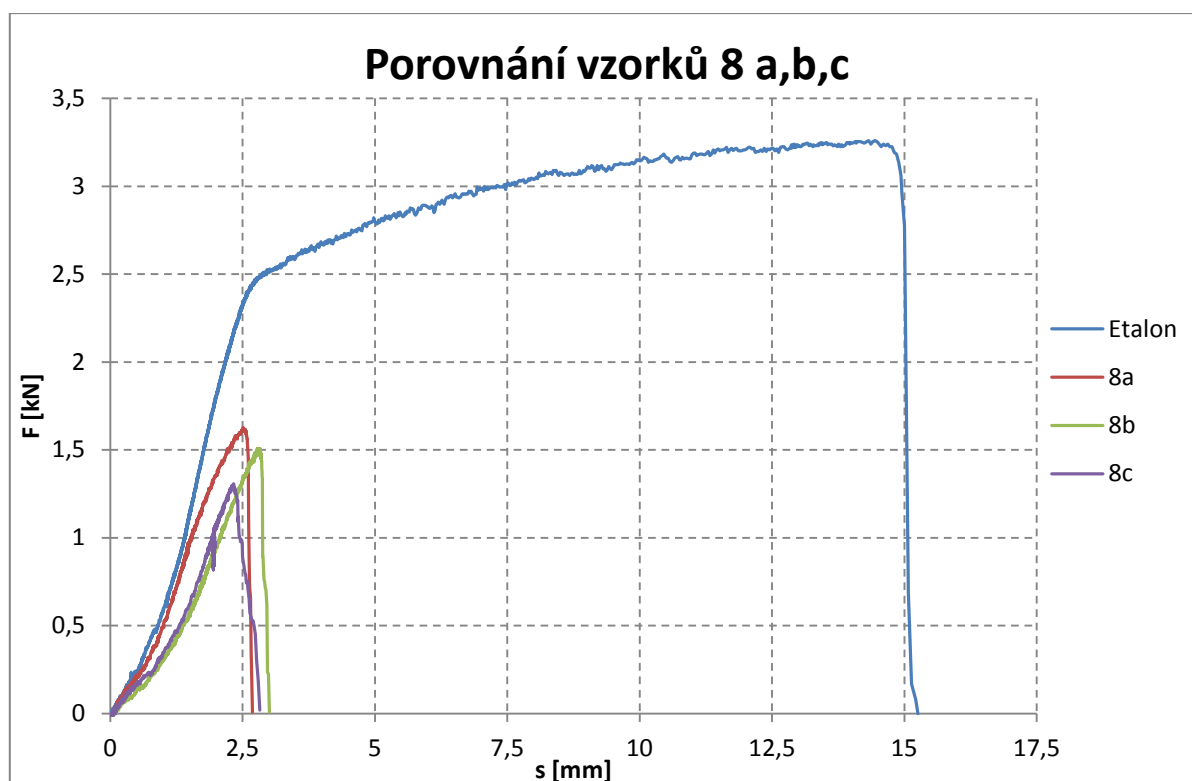
Průběhy tahových zkoušek vzorků jednotlivých svarů (vždy tři) jsou znázorněny v grafu tahové zkoušky etalonu pro porovnání. Tahové zkoušky vzorků s nejlepšími vlastnostmi jsou na následujících obrázcích. Obrázky tahových diagramů ostatních vzorků jsou uvedeny v příloze číslo 4. Na tahové zkoušce nebyl vyhodnocován vzorek číslo 9. Jeho vstupní parametry byly takřka stejné jako u vzorku číslo 1.



Obr. 59 Tahová zkouška vzorku 2.



Obr. 60 Tahová zkouška vzorku 3.



Obr. 61 Tahová zkouška vzorku 8.

U vzorků 10 a 11, došlo v průběžích vykreslovaných diagramů k neočekávaným výchylkám (viz přílohy)

Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 6. Ačkoli se v tabulce uvádí tažnost, žádný ze vzorků se svarem nedosáhl meze kluzu. Do programu, který zpracuje data, však pro každý vzorek byla zadána minimální výsledná tažnost, aby bylo možno zpracovat zbytek hodnot.

Tab. 6 Naměřené hodnoty.

Číslo zk.	a [mm]	b [mm]	$S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	$F_m$ [N]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	Vzorek
1	1	12	12	3254	211,599996	271,1667	0a
2	1	12	12	3310,4	212,400004	275,8667	0b
3	1	12	12	3216,4	204,566671	268,0333	0c
4	1	11,6	11,6	1062,8	69,7241346	91,62069	1a
5	1	12,6	12,6	1580	107,492062	125,3968	1b
6	1	11,8	11,8	1504,8	89,2542317	127,5254	1c
7	1	11,8	11,8	1692,8	-1,59322025	143,4576	2a
8	1	11,6	11,6	1532,8	118,379302	132,1379	2b
9	1	11,8	11,8	1711,6	134,67796	145,0508	2c
10	1	11,65	11,65	1608	131,570824	138,0258	3a
11	1	11,6	11,6	1702,4	141,068963	146,7586	3b
12	1	11,75	11,75	1796,4	148,085106	152,8851	3c
13	1	11,7	11,7	1081,6	45,0256407	92,44444	4a
14	1	11,75	11,75	1100,4	64,8170192	93,65107	4b
15	1	11,7	11,7	620,8	40,2051283	53,05983	4c
16	1	12	12	1090,8	69,7333323	90,9	5a
17	1	11,6	11,6	1420	100,517238	122,4138	5b
18	1	11,9	11,9	1307,2	80,6050456	109,8487	6a
19	1	11,7	11,7	1354,4	87,6239289	115,7607	6b
20	1	11,4	11,4	1392	105,578949	122,1053	6c

číslo zk.	a [mm]	b [mm]	S <sub>0</sub> [mm <sup>2</sup> ]	F <sub>m</sub> [N]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	Vzorek
21	1	11,85	11,85	884	44,4556937	74,59915	7a
22	1	11,65	11,65	959,2	59,7424912	82,33477	7b
23	1	11,6	11,6	818	47,0344791	70,51724	7c
24	1	11,9	11,9	1626,8	135,126055	136,7059	8a
25	1	11,85	11,85	1504,8	109,535861	126,9873	8b
26	1	11,75	11,75	1307,2	87,254973	111,2543	8c
27	1	11,99	11,99	1693,6	137,314433	141,251	10a
28	1	11,99	11,99	1486	121,601337	123,9366	10b
29	1	11,3	11,3	1533,2	92,389379	135,6814	10c
30	1	11,74	11,74	1589,6	124,156729	135,4003	11a
31	1	11,55	11,55	1655,2	128,658007	143,3074	11b
32	1	11,54	11,54	1523,6	131,195841	132,0277	11c

Pokračování tab. 6 Naměřené hodnoty

číslo zk.	A [%]	T [s]	V <sub>t</sub> [mm/min]	V <sub>u</sub> [MPa/s]	Vzorek	Poznámka
1	8,75	93,0999988	3,16162719	3,41285189	0a	trhlina mimo rysky
2	12,5	48,6199994	3,48824266	6,35868992	0b	
3	11,25	46,9199976	3,17524863	5,61940105	0c	
4	0,124998	18,8400005	14,8486418	15,1020263	1a	
5	0,124998	21,4399991	10,6010151	12,3518909	1b	
6	0,124998	22,7999999	14,2393349	5,49741295	1c	
7	0,124998	23,2999987	2,04197769	2,8091974	2a	
8	0,124998	26,1800002	10,7601711	11,1844062	2b	
9	0,124998	24,3999995	4,63021869	6,1968699	2c	
10	0,124998	25,0399989	5,97693524	9,05044405	3a	
11	0,124998	26,7799986	8,46201098	11,802687	3b	
12	0,124998	28,0199998	8,17314167	11,882117	3c	
13	0,124998	18,6599998	11,7317586	15,6632181	4a	
14	0,124998	18,6600002	11,5202363	12,7687176	4b	
15	0,124998	12,7200001	11,0468097	12,0979693	4c	
16	0,124998	17,5799992	9,80971307	7,45079056	5a	
17	0,124998	21,2999991	1,05881698	2,19616975	5b	
18	0,124998	18,2199992	1,25451796	1,33516213	6a	
19	0,124998	20,3999995	0,53322312	1,19562893	6b	
20	0,124998	21,0199988	2,77906209	3,94935607	6c	
21	0,124998	9,19999987	27,4791633	34,447977	7a	
22	0,124998	15,1999992	1,10605703	0,70571406	7b	
23	0,124998	14,2999996	6,05649064	6,90302994	7c	
24	0,124998	22,4999992	1,52899876	2,20879337	8a	
25	0,124998	22,3400004	3,85429886	4,17320301	8b	
26	0,124998	20,3299999	25,7526643	27,5803207	8c	
27	0,124998	23,1999992	20,2303202	12,4048855	10a	
28	0,124998	24,4799995	57,0464314	70,3919185	10b	
29	0,124998	24,1199991	4,10883389	4,00152271	10c	
30	0,124998	22,5199998	2,45551326	2,78327759	11a	
31	0,124998	26,9399998	17,5839146	9,08485899	11b	
32	0,124998	22,9399994	1,52908973	3,08427631	11c	

Tab. 7 Statistika 31 vzorků.

a [mm]	b [mm]	S <sub>0</sub> [mm <sup>2</sup> ]	F <sub>m</sub> [N]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]
1	11,77129	11,77129	1568,181	106,2111	132,930909
0	0,233856	0,233856	626,1316	49,25741	51,7506209
0	0,019867	0,019867	0,399273	0,463769	0,38930465
1	12,6	12,6	3310,4	212,4	275,866659
1	11,3	11,3	620,8	-1,59322	53,0598289

Pokračování tabulky 7.

A [%]	T [s]	V <sub>t</sub> [mm/min]	V <sub>ti</sub> [MPa/s]
1,161289	25,21742	9,10554242	9,9391763
3,202852	14,61525	10,8072145	12,803225
2,758016	0,57957	1,18688311	1,2881576
12,5	93,1	57,0464314	70,391919
0,124998	9,2	0,53322312	0,7057141

#### 7.4 Vyhodnocení výsledků

Z provedených zkoušek a zkoušek mechanických vlastností (mikrotvrdosti, tahová) byly zpracovány grafy a tabulky s hodnotami pro vyhodnocení. Nejlepších výsledků na tahové zkoušce bylo dosaženo na vzorku číslo 2. Z dalších vzorků to byly vzorky 10 a 11. Tyto výsledky potvrdily i obrázky makrostruktury vzorků. Z výsledků porovnání šířky svarů a hloubky průvaru, vyšly jako nejlépe provedené vzorky 2, 10, 11. Při testech svařování solaru se propad svaru jevil jako vada, mající vliv na pevnost svaru a těsnost. Protože tímto výzkumem se prokázalo, že tento svar vykazuje nejlepší mechanické vlastnosti, pak nezbývá, než ho doporučit.

## 8 ZÁVĚR

V rešeršní části práce byl uveden dříve použitý materiál a na jejím základě vybrán materiál nový, hliník třídy 5000. Aby bylo možné prokázat vhodnost použití daného materiálu, byly zkoumány jeho mechanické vlastnosti a jejich změny po svaření. Na základě výběru nového materiálu se zvolila vhodná metoda i zařízení pro svařování - diodový optický laser Yb-YAG. V další části byl popsán princip laseru a uvedeny metody jeho využití ve strojírenství, včetně uvedení běžně používaných typů laserů.

Během svařování se ve zkušebních vzorcích objevilo několik vad. Možné typy vad vnika-  
jících při svařování, jsou v práci uvedeny. Ve vzorcích se z těchto typů objevily především  
bubliny a řetězce bublin.

Pro posouzení mechanických vlastností svarů se vyhotovilo celkem 11 vzorků, u kterých  
byly nastaveny různé parametry svařování. U všech vzorků se zhotovily makroskopické  
snímky, které byly vyhodnoceny – změřeny šířky svarů a hloubky průvarů. Dále byly vzorky  
podrobeny tahové zkoušce, a vybraný vzorek také zkoušce tvrdosti dle Vickerse.

Díky porovnání mechanických vlastností zkoumaných vzorků byly určeny optimální  
vstupní parametry. Tyto parametry náleží vzorku v práci označeným číslem 2 a jsou doporu-  
čeny pro výrobu absorbérů.



## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. BARTÁK, Jiří. Typy vad, příčiny jejich vzniku a hodnocení. In: *Česká svářečská společnost ANB* [online]. 2012 [cit. 2014-04-18]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384>
2. BENKO B., FODEREK P., KOSECEK M., BIELAK R.: *Laserové technologie*, 1. vyd., Bratislava, Vydavateľstvo STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9
3. BLAHUTA, Ladislav. *Destruktivní zkoušky* [online]. Havířov, 2013 [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: [http://www.outech-havirov.cz/skola/files/eu\\_penize\\_skolam/dum/zks\\_mag/vy\\_32\\_inovace\\_h17-1.pdf](http://www.outech-havirov.cz/skola/files/eu_penize_skolam/dum/zks_mag/vy_32_inovace_h17-1.pdf). Prezentace. Havířov-Šumbark.
4. *Citace.com* [online]. 2009 [cit. 2014-02-25]. Dostupné z: [www.citace.com](http://www.citace.com)
5. Co byste rádi věděli o průmyslových laserech. In: DUŠEK, Jiří. *MEGABLOG* [online]. 2012 [cit. 2014-02-27]. Dostupné z: <http://www.mega-blog.cz/lasery/co-byste-radi-vedeli-o-prumyslovych-laserech/>
6. Dělení laserů. In: VOBOŘILOVÁ, Pavla. *Slon.fsv.cvut.cz* [online]. 2002 [cit. 2014-02-28]. Dostupné z: <http://slon.fsv.cvut.cz/~pavla/laser/node4.html>
7. FRANTA, Tomáš. Vysokopevnostní ocelové plechy svařované laserem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2012, roč. 15, č. 9, s. 1 [cit. 2014-02-24]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vysokopevnostni-ocelove-plechy-svarovane-laserem.html>
8. HAMERNÍK, Jan. Vlastnosti kovových materiálů a jejich zkoušení. In: *Jhamernik.sweb* [online]. 2006 [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: <http://jhamernik.sweb.cz/vlastnosti.htm>
9. HAVRILLA, David a Rüdiger BROCKMANN. Třetí generace diskových laserů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2009, č. 11 [cit. 2014-03-03]. DOI: 091140. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/treti-generace-diskovych-laseru.html>
10. Historie laseru. *Laserart* [online]. 2010 [cit. 2014-02-25]. Dostupné z: [http://www.laserart.wbs.cz/Historie\\_laseru.html](http://www.laserart.wbs.cz/Historie_laseru.html)
11. Hliník ( $_{13}\text{Al}$ ). *Chemie* [online]. 2006 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: [http://chemie.gfxs.cz/index.php?pg=prvek&prvek\\_id=13](http://chemie.gfxs.cz/index.php?pg=prvek&prvek_id=13)
12. *Hliník a jeho slitiny*. Technická univerzita v Liberci, 2013. [cit. 2014-03-19] Dostupné z: 39. [www.kmt.tul.cz/edu/podklady.../HLINIK\\_a\\_jeho\\_slitiny\\_podklady.ppt](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady.../HLINIK_a_jeho_slitiny_podklady.ppt). Prezentace. Technická univerzita v Liberci.
13. Hliník: Historie hliníku. *Alinvest* [online]. 2012 [cit. 2014-03-19]. Dostupné z: <http://www.alinvest.cz/cs/hlinik/historie-hliniku>KŘÍŽ, R.; VÁVRA, P. *Strojírenská příručka-3.svazek*. Praha: Scientia, 1993. 254 s. ISBN 80-85827-23-9
14. *Hodnocení kvality svarového spoje* [online]. 2005 [cit. 2014-04-16]. Dostupné z: [http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TE1/def\\_kontrola\\_sv.pdf](http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TE1/def_kontrola_sv.pdf)
15. KACHTÍK, Lukáš. *Laser* [online]. 2009 [cit. 2014-02-25]. Dostupné z: <http://www.lasery.wz.cz/>
16. KOLAŘÍK, Ladislav. *Destruktivní a nedestruktivní zkoušky svarových spojů* [online]. České vysoké učení technické v Praze, 2009 [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: [http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TMSV/zkousky\\_svaru\\_ndt.pdf](http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TMSV/zkousky_svaru_ndt.pdf). Prezentace. Vysoké učení technické.

17. KOVAŘÍK, R a F ČERNÝ. *Technologie svařování*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-697-5.
18. LAKSHMI, Anand. Laser Beam Welding. *UStudy* [online]. 2008 [cit. 2014-03-11]. Dostupné z: <http://www.ustudy.in/node/4766>
19. Laser. *Britannica.com* [online]. 2010 [cit. 2014-02-25]. Dostupné z: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/330874/laser/256336/History>
20. Laserové hybridní svařování. In: *AWL* [online]. 2014 [cit. 2014-03-18]. Dostupné z: [http://www.awl.nl/cz/technologies/laser\\_welding/hybrid\\_laser](http://www.awl.nl/cz/technologies/laser_welding/hybrid_laser)
21. Laserové svařování kovových materiálů. *LAO Lasery a Optika* [online]. 2014 [cit. 2014-02-24]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/aplikace-79/laserove-svarovani-a-navarovani-86/laserove-svarovani-kovovych-materialu-88>
22. Laserové svařování. *Centrum laserových a automatizačních technologií* [online]. 2014 [cit. 2014-03-18]. Dostupné z: <http://laser.zcu.cz/wiki/laserove-svarovani>
23. *Lasery* [online]. 2007 [cit. 2014-03-05]. Dostupné z: <http://tc-pipa.wz.cz/lasery.html#pevnolatkove>
24. LEIDORF, Michal. *SROVNÁNÍ SVARŮ VYTVOŘENÝCH CO2 LASEREM A VLÁKNOVÝM LASEREM* [online]. Vysoké učení technické v Brně, 2011 [cit. 2014-03-04]. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=39663](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=39663). DP. Vysoké učení technické. Vedoucí práce Libor Mrňa.
25. MARTAN, Jiří. Víte, co máte v laserovém stroji za zdroj?. *Automobil Industry* [online]. 2013, roč. 16, č. 1 [cit. 2014-03-03]. Dostupné z: <http://infocube.cz/cs/vite-co-mate-v-laserovem-stroji-za-zdroj/>
26. MICHNA, Š. et al. *Encyklopedie hliníku*. Prešov: Adin s.r.o., 2005. 721 s. ISBN 80-89041-88-4
27. MLEJNEK, Z. *Optické zesilovače*. Brno 2008. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav tel komunikací. 45 s. doc. Ing. Miloslav Filka, CSc.
28. MRŇA, Libor. *Rešerže svařování hliníku*. Vysoké učení technické v Brně, 2012, 2 s.
29. MRŇA, Libor. *Svařování laserem* [online]. Brno, 2012 [cit. 2014-03-07]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory\\_soubory/hsv\\_\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_\\_svarovani\\_laserem\\_2013\\_\\_mrna.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__svarovani_laserem_2013__mrna.pdf). Prezentace. Vysoké učení technické.
30. MRŇA, Libor. *Technologie svařování hliníku a jeho slitin*. Brno, 2012 [cit. 2014-03-26]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory\\_soubory/hsv\\_\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_\\_technologie\\_svarovani\\_hliniku\\_a\\_jeho\\_slitin\\_2013\\_\\_mrna.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__technologie_svarovani_hliniku_a_jeho_slitin_2013__mrna.pdf). Prezentace. Vysoké učení technické.
31. MRŇA, Libor. *Technologie využívající laser* [online]. Brno, 2012 [cit. 2014-03-05]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory\\_soubory/hsv\\_\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_\\_svarovani\\_laserem\\_2013\\_\\_mrna.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__svarovani_laserem_2013__mrna.pdf). Prezentace. Vysoké učení technické.
32. MRŇA, Libor. *Technologie využívající laser*. Brno, 2012 [cit. 2014-03-18]. Dostupné z:

- [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory\\_soubory/hsv\\_\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_\\_technologie\\_vyuzivajici\\_laser\\_2013\\_\\_mrna.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__technologie_vyuzivajici_laser_2013__mrna.pdf). Prezentace. Vysoké učení technické.
33. MRŇA, Libor. *Základy laserové techniky* [online]. Brno, 2012 [cit. 2014-02-14]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory\\_soubory/hsv\\_\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_\\_zaklady\\_laserove\\_techniky\\_2013\\_\\_mrna.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__zaklady_laserove_techniky_2013__mrna.pdf). Prezentace. Vysoké učení technické.
34. NĚMEČEK, Stanislav a Tomáš MUŽÍK. Laserem nanesené práškové povlaky. *Tribotechnika* [online]. 2012, roč. 5, č. 2 [cit. 2014-03-17]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-32012/laserem-nanesene-praskove-povlaky.html>
35. NEUMANN, Heinz. *TEORIE SVAŘOVÁNÍ A PÁJENÍ: Metalurgické základy metod tlakového svařování. Fyzikální a fyzikálně - chemické charakteristiky svařovacích procesů – odporové svařování*. Technická univerzita v Liberci, fakulta strojní, katedra strojírenské technologie, 2013. Dostupné z: [http://www.technomat.cz/data/katedry/ksp/KSP\\_TSP\\_PR\\_06\\_CZE\\_Neumann\\_Metalurgicke\\_zaklady\\_metod\\_tlakoveho\\_svarovani.pdf](http://www.technomat.cz/data/katedry/ksp/KSP_TSP_PR_06_CZE_Neumann_Metalurgicke_zaklady_metod_tlakoveho_svarovani.pdf). Prezentace. Technická univerzita v Liberci.
36. Princip pevnolátkových Nd:YAG laserů - 1064nm Infra red. In: *Leonardo technology automatizace průmyslového značení* [online]. 2013 [cit. 2014-03-02]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/cs/znaceni-laserem-solaris/lasery-info-learning?start=12>
37. PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu II*. Brno: CERM, 2001. 505 s. ISBN 80-7204-193-2
38. QUINTINO, L, R MIRANDA, U DILTHEY, D IORDACHESCU, M BANASIK a S STANO. *Laser Welding of Structural Aluminium* [online]. 2012, 25 s. [cit. 2014-04-15]. ISBN 978-3-642-18186-3. Dostupné z: <http://www.springer.com/978-3-642-18186-3>
39. REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Lasery kapalinové. In: *Encyklopedie fyziky* [online]. 2014 [cit. 2014-03-04]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/787-lasery-kapalinove>
40. ROUBÍČEK, Martin. Laserové svařování - ekonomika a kvalita. *KONSTRUKCE* [online]. 2006, č. 2 [cit. 2014-03-07]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/laserove-svarovani-ekonomika-a-kvalita/>
41. ROUBÍČEK, Martin. Řezání CO2 laserem – Optický systém Bifocal. *KONSTRUKCE* [online]. 2005, č. 2 [cit. 2014-03-08]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/rezani-co2-laserem-opticky-system-bifocal/>
42. ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonenční metody obrábění 4 díl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008, č. 3 [cit. 2014-03-19]. DOI: 080304. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-4-dil.html>
43. ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonenční metody obrábění 5 díl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008, č. 5. [cit. 2014-03-11]. DOI: 080504. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-5-dil.html>
44. SCHWARZ, Drahomír. Hodnocení svarových spojů. In: *Český svářečský ústav* [online]. Ostrava, 2009 [cit. 2014-04-25]. Dostupné z: [http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/2009-2\\_Hodnocen%C3%AD%20svarov%C3%BDch%20spoj%C5%AF.pdf](http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/2009-2_Hodnocen%C3%AD%20svarov%C3%BDch%20spoj%C5%AF.pdf)

45. Svarové spoje. *Stránka o svařování* [online]. 2004 [cit. 2014-04-16]. Dostupné z: <http://www.mitcalc.com/doc/welding/help/cz/welding.htm>
46. *Svařování Laser-Hybridem* [online]. Vysoká škola báňská, 2009, 6 s. [cit. 2014-03-18]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/2-04.pdf>
47. SVĚTLO, LASEROVÉ ZÁŘENÍ. *Therapy* [online]. 2009 [cit. 2014-02-27]. Dostupné z: <http://www.therapy.cz/laserove-zareni.php>
48. The Race to Build a Laser. *American Institute of Physics* [online]. 2014 [cit. 2014-02-14]. Dostupné z: <http://www.aip.org/history/exhibits/laser/sections/therace.html>
49. Trulaser robot - technologická špička. *Vaněk - strojírenská výroba* [online]. 2008 [cit. 2014-02-24]. Dostupné z: [http://www.vanek-ostrava.cz/cz/stred\\_plech\\_svarlaser.html](http://www.vanek-ostrava.cz/cz/stred_plech_svarlaser.html)
50. Základní přehled průmyslových laserů. *LAO Lasery a Optika* [online]. 2014 [cit. 2014-03-03]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
51. ZATLOUKAL, Petr. Tepelné zpracování laserem. LUKÁŠEK, Jaromír. *Welding* [online]. 2010 [cit. 2014-03-11]. Dostupné z: <http://www.welding.cz/laser/tepelne.htm>
52. ZAVI. 2010, 14 s. Dostupné z: <http://sps-projekt.hostuju.cz/soubory/ZAV1-svarovani.pdf>

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

<b>Zkratka</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Popis</b>
<b>Al</b>	[-]	Hliník
<b>Ar</b>	[-]	Argon
<b>ČSN</b>	[-]	Česká Státní Norma
<b>Co</b>	[-]	Kobalt
<b>CO<sub>2</sub></b>	[-]	Oxid uhličitý
<b>Cr</b>	[-]	Chrom
<b>Cu</b>	[-]	Měď
<b>EN</b>	[-]	Evropská Norma
<b>FSV</b>	[-]	Friction Stir Welding
<b>He</b>	[-]	Helium
<b>IR</b>	[-]	Infrared
<b>ISO</b>	[-]	International Organization for Standardization
<b>Laser</b>	[-]	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
<b>LED</b>	[-]	Light-Emitting Diode
<b>MAG</b>	[-]	Metal Active Gas
<b>MASER</b>	[-]	Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation
<b>Mg</b>	[-]	Hořčík
<b>MIG</b>	[-]	Metal Inert Gas
<b>N<sub>2</sub></b>	[-]	Dusík
<b>Ni</b>	[-]	Nikl
<b>RTG</b>	[-]	Rentgenové záření
<b>Si</b>	[-]	Křemík
<b>Tab.</b>	[-]	Tabulka
<b>TIG</b>	[-]	Tungsten Inert Gas
<b>TOO</b>	[-]	Tepelně Ovlivněná Oblast
<b>UV</b>	[-]	Ultraviolet
<b>YAG</b>	[-]	Yttrium Aluminium Granát
<b>Zn</b>	[-]	Zinek
<b>apod.</b>	[-]	a podobně
<b>atd.</b>	[-]	a tak dále
<b>č.</b>	[-]	číslo
<b>max.</b>	[-]	maximálně

<b>např.</b>	[-]	například
<b>obr.</b>	[-]	obrázek
<b>roč.</b>	[-]	ročník
<b>tzv.</b>	[-]	tak zvaný
<b>zk.</b>	[-]	zkouška

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

<b>Symbol</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Popis</b>
<b>A</b>	[%]	tažnost
<b>E<sub>i</sub></b>	[J]	energie pulsu
<b>F</b>	[Hz]	frekvence impulsu
<b>F<sub>e</sub></b>	[MPa]	Síla na mezi kluzu
<b>F<sub>m</sub></b>	[N]	maximální síla
<b>L<sub>0</sub></b>	[mm]	počáteční měřená délka
<b>L<sub>U</sub></b>	[mm]	měřená délka po lomu
<b>P</b>	[W]	výkon laseru
<b>P<sub>str</sub></b>	[W]	střední výkon paprsku
<b>P<sub>max</sub></b>	[W]	maximální výkon impulsu
<b>R<sub>e</sub></b>	[MPa]	mez kluzu
<b>R<sub>m</sub></b>	[MPa]	mez pevnosti
<b>R<sub>p 0,2</sub></b>	[%]	smluvní mez kluzu
<b>S<sub>0</sub></b>	[mm <sup>2</sup> ]	počáteční průřez zkušebního tělesa
<b>S<sub>U</sub></b>	[mm <sup>2</sup> ]	průřez zkušebního tělesa po lomu
<b>T</b>	[s]	čas
<b>V<sub>t</sub></b>	[mm/min]	rychlost tažení vzorku
<b>V<sub>tt</sub></b>	[MPa/s]	rychlost nárůstu tahové síly
<b>W</b>	[W]	Watt jednotka výkonu
<b>Z</b>	[%]	kontrakce
<b>a</b>	[mm]	tloušťka zkušební tyče
<b>d</b>	[mm]	průměr fokusačního paprsku
<b>l<sub>0</sub></b>	[mm]	počáteční délka
<b>m</b>	[m]	metr jednotka délky
<b>s</b>	[mm]	poloha ohniska vůči povrchu materiálu
<b>v</b>	[mm·s <sup>-1</sup> ]	rychlost svařování

$v_1$	[-]	mód jedna
$v_2$	[-]	mód dva
$v_3$	[-]	mód tři
$\alpha$	[-]	intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe $\alpha$
$\Delta l$	[mm]	celkové prodloužení
$\varepsilon$	[l]	poměrné prodloužení
$\tau$	[s]	délka impulsu
$\omega$	[-]	intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe

## Seznam obrázků

Obr. 1 Svařování laserem. [7],[21].....	7
Obr. 2 Solární absorber. ....	8
Obr. 3 Přehled svařovacích metod. [49].....	9
Obr. 4 Princip laseru. [47].....	10
Obr. 5 První laser T. Mainmana. [48] .....	11
Obr. 6 Procentuální podíl nejdůležitějších laserových aplikací. [42] .....	11
Obr. 7 Dělení laserů dle vlnových délek záření. [2].....	12
Obr. 8 Nd: YAG laser. [50].....	13
Obr. 9 Schéma aktivního prostředí diskového laseru. [25].....	14
Obr. 10 Vláknový laser s vláknem dopovaný yterbiem. [50] .....	14
Obr. 11 Schéma principu plynového laseru. [24].....	15
Obr. 12 Schéma diodového laseru. [42] .....	16
Obr. 13 Svařování laserem. [18] .....	18
Obr. 14 Svařovací režimy laserového paprsku. [31] .....	19
Obr. 15 Princip klíčové dírky. [40] .....	20
Obr. 16 Řezání laserem. [50] .....	21
Obr. 17 Kalení laserem. [43].....	22
Obr. 18 Popisování součástí přes masku. [43] .....	23
Obr. 19 Popisování vychylováním paprsku. [43].....	23
Obr. 20 Výrobky gravírované laserem. [43] .....	23
Obr. 21 Nanášení povlaků laserem. [43].....	24
Obr. 22 Princip metody laser hybrid. [46] .....	24
Obr. 23 Kombinace laseru a MIG/MAG. [20] .....	25
Obr. 24 Rozdělení slitin hliníku. [12] .....	27
Obr. 25 Soustava Al – Mg. [30] .....	28
Obr. 26 Absorpce kovů. [28].....	30
Obr. 27 Popis svaru. [14] .....	32
Obr. 28 Typy svarů. [29].....	32
Obr. 29 Dělení svarů. [29].....	33
Obr. 30 Vady ve svarech dle tvaru a polohy. [44] .....	33
Obr. 31 Vady při tavném svařování. [1].....	34
Obr. 32 Vady svarových spojů. [1] .....	35
Obr. 33 Velmi nebezpečné vady svarových spojů. [1] .....	36
Obr. 34 Kapilární zkouška. [8].....	37
Obr. 35 Zkušební tyče. [3] .....	38



Obr. 36 Tahový diagram. [3].....	39
Obr. 37 Zkouška vrubové houževnatosti. [8] .....	40
Obr. 38 Zkouška rozlomením. [8] .....	40
Obr. 39 Zkoušky tvrdosti. [8] .....	40
Obr. 40 Vláknový laser YLS 2000.....	41
Obr. 41 Svařování vzorků laserem. ....	42
Obr. 42 Uchycení plechů v průběhu svařování. ....	42
Obr. 43 Stroje pro práci se vzorky. ....	43
Obr. 44 Zatavené vzorky. ....	43
Obr. 45 Makrostruktura vzorku 1.....	44
Obr. 46 Makrostruktura vzorku 2.....	45
Obr. 47 Makrostruktura vzorku 3.....	46
Obr. 48 Makrostruktura vzorku 4.....	47
Obr. 49 Makrostruktura vzorku 5.....	48
Obr. 50 Makrostruktura vzorku 6.....	49
Obr. 51 Makrostruktura vzorku 7.....	50
Obr. 52 Makrostruktura vzorku 8.....	51
Obr. 53 Makrostruktura vzorku 9.....	52
Obr. 54 Makrostruktura vzorku 10.....	52
Obr. 55 Makrostruktura vzorku 11.....	53
Obr. 56 Grafická závislost zkoušky tvrdosti. ....	54
Obr. 57 Hydraulický zkušební stroj ZD40/400kN/. ....	55
Obr. 58 Průběh tahové zkoušky vzorků bez svaru .....	55
Obr. 59 Tahová zkouška vzorku 2. ....	56
Obr. 60 Tahová zkouška vzorku 3. ....	56
Obr. 61 Tahová zkouška vzorku 8. ....	57

## Seznam tabulek

Tab. 1 Srovnání metod [31].....	18
Tab. 2 Vlastnosti hliníku [26] .....	26
Tab. 3 Vstupní svařovací parametry .....	42
Tab. 4 Vyhodnocení svarů .....	53
Tab. 5 Hodnoty zkoušky tvrdosti. ....	54
Tab. 6 Naměřené hodnoty. ....	57
Tab. 7 Statistika 31 vzorků.....	59

## Seznam rovnic

(6.1) Mez kluzu .....	39
(6.2) Mez pevnosti v tahu.....	39
(6.3) Poměrné prodloužení .....	39
(6.4) Tažnost.....	39
(6.5) Kontrakce.....	39

## Seznam příloh

Příloha číslo 1 .....	1
Příloha číslo 2.....	2
Příloha číslo 3.....	3
Příloha číslo 4.....	4



# PŘÍLOHY

## Příloha číslo 1

### Inspection certificate No. **113445PL** EN 10204/3.1

<b>Dodavatel (Supplier):</b>  <b>Alcom Alval s.r.o.</b> Křemenáčová 174/2 104 00 Praha-Pitkovice Česká republika IČ: 25352822 DIČ: CZ25352822 Tel: 554 773 052-5 Fax: 554 773 050 E-mail: hlinik@hlinik.cz	<b>Odběratel (Consignee):</b>  <b>AQUAdem, s.r.o.</b> Tovární 739/1 643 00 Brno 43 Česká republika IČ: 25309340 DIČ: CZ25309340 Tel: +420 545 229 775 Fax: E-mail: som@aquadem.cz
<b>Materiál (Material): PL00196</b> <b>plech př. tl. 1,0 mm, AlMg3 čtvrttvrdý, EN AW-5754 H22, EN 573-3, EN-485-1+A1,-2,-4</b>	
<b>Rozměr (Dimension) [mm]: 1500x3000 mm</b>	
<b>Množství (Quantity): 2,00 ks</b>	

Kupní smlouva (Contract): KS 1402650  
Objednávka (Purchase order):  
Dodací list (Shipping document): DLV 1401686  
Originální atest (OIC No.): 359555/03  
Ze dne (Date): 29.11.2011  
Původ zboží (Origin): PL

#### Mechanické vlastnosti (Mechanical properties)

Číslo šarže (Lot number)	Číslo tavby (Cast number)	Pevnost v tahu (Tensile strength) [Mpa]	Mez kluzu (Yield strength) [Mpa]	Tažnost (Elongation) [%]	Tvrdost HB (Hardness)
131415	1314151	220	142	A50=20	-

#### Chemické složení (Chemical composition)[%]

Prvek (Element)	Silicon Si	Iron Fe	Copper Cu	Manganese Mn	Magnesium Mg	Chromium Cr	Zinc Zn	Titanium Ti	Aluminium Al
Hodnota (Content)	0,343	0,275	0,070	0,325	2,751	0,037	0,054	0,026	-

Poznámka (Note): -

Za správnost údajů odpovídá: Ivan Vodák

Podpis:

Razítko:  **ALCOM ALVAL**  
ALUMINIUM

Ivan Vodák  
IČ: 25352822  
DIČ: CZ25352822

Alcom Alval s.r.o.  
Krnovská 1397/47  
792 01 Bruntál



Příloha číslo 2

př. č.	Název vady	Označování vad		Charakteristika vady
		ISO 6520	IIW	
1	Trhlina	100	E	
	Mikrotrhlina	1001		
	Podélná trhlina	101	Ea	Směr trhliny rovnoběžný s osou svaru
	Příčná trhlina	102	Eb	Směr trhliny kolmý na osu svaru
	Radiální trhlina	103	E	Trhlina vychází ze společného bodu
	Kráterová trhlina	104	Ec	Tvoří se v kráteru svaru
	Rozvětvené trhlina	106	E	Skupina pospojovaných trhlín
2	Dutiny	200		
	Plynová dutina	201	A	Dutina vyplněná plynem
	Bublina	2011	Aa	Plynová dutina kulového tvaru
	Shluk dutin	2013	Ad	Skupina plynových dutin
	Rádka dutin	2014	Ac	Plynové dutiny rozmístěné rovnoběžně s osou svaru
	Pór	2015	Ab	Protažená dutina rovnoběžně s osou svaru
	Červovitá dutina	2016	Ab	
	Staženina	202	K	Dutina způsobená při tuhnutí kovu
3	Mezidendritická staženina	2021		Prodloužená staženina vznikající při ochlazování mezi dendrity
	Vměstky	300	B	Tuhá cizí tělesa ve svarovém kovu
	Struskový vměstek	301	Ba	Struska uzavřená ve svarovém kovu
	Tavidlový vměstek	302	G	Tavidlo uzavřené ve svarovém kovu
	Oxidický vměstek	303	J	Kovový oxid ve svarovém kovu
	Kovový vměstek	304	H	Částice cizího kovu ve svarovém kovu
4	Vady odtavování a závaru	400		
	Studený spoj	401	C	Vada ve spojení mezi svarovým a základním kovem nebo mezi housenkami
	Neprovařený kořen	402	Db, Dc	Vada ve spojení základního materiálu v důsledku nedostatku svarového kovu v kořeni svaru
5	Vady tvaru	500		Chybný tvar vnějšího povrchu svaru nebo nedokonalá geometrie spoje
	Zápal	5011, 5012	F	Drážka na povrchu nebo v kořeni svaru vzniklá při svařování
	Propadlý kořen	5012		Málká drážka po obou okrajích kořene
	krápník	5041		Nadměrné propadnutí kořene
6	Různé vady	600		Všechny vady nezařazené do skupin 1 až 5
	Dotek elektrodou	601		
	rozstřík	602		

### Příloha číslo 3

#### Hydraulický zkušební stroj ZD40/400kN/

Stroj umožňuje provádět tahové, tlakové a ohybové zkoušky materiálů do 400 kN s řízením rychlosti zatěžování a programovým zpracováním zkoušek. Je vybaven vestavěným inkrementálním délkovým snímačem polohy příčnicku s rozlišením 0,01 mm a snímačem síly s řídicí jednotkou EDC 60.

Řídicí jednotka EDC 60 je vysoce precizní elektronické zařízení speciálně konstruované pro řízení servo-hydraulických zkušebních strojů. Je vyráběna speciálně pro aplikace řízení zkušebních strojů a využívají ji přední evropští výrobci universálních zkušebních strojů. Jednotka je opatřena programem pro zkoušky kovů s možností provádět zkoušky bez PC u jednoduchých aplikací bez použití průtahoměru.

Technické parametry:

- Výrobce: HBM /SRN/
- Měřicí rozsah: 8 ÷ 400 kN
- Chyba měření síly: 1/100 jmenovitého rozsahu síly, tj.  $\pm 1 \%$  odpovídá třídě přesnosti 1
- Měřicí rozsah měření dráhy: 0 ÷ 280 mm
- Chyba měření dráhy:  $\pm 0,01$  mm
- sériové rozhraní RS 232 pro komunikaci s nadřazeným PC
- COM1 pro PC s FIFO s maximální rychlostí 115 KB
- inkrementální vstup pro napojení snímače dráhy

Počítač je vybaven programem M-TEST v.1.7 pro tahovou, tlakovou a ohybovou zkoušku kovových materiálů dle EN 10001-2 s vyhodnocením výsledků, grafickým zpracováním.



Řídicí jednotka EDC 60

